

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

МИНСК. БЕЛОРУССКАЯ НАУКА. 2019. ТОМ 63. № 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. Волотовский – Институт биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь

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

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

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

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

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

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

Ф. Ф. Комаров – Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко

Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

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

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

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

О. Н. Левко – Институт истории Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
В. Ф. 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 биорганической 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

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

Адрес редакции:

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

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ. 2019. Т. 63. № 3

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор Т. П. П е т р о в и ч
Компьютерная верстка Н. И. К а ш у б а

Сдано в набор 11.06.2019. Выпуск в свет 26.06.2019. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 142 экз. Заказ 151.

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

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

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

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

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

MINSK. BELARUSKAYA NAVUKA. 2019. Vol. 63. No. 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 – Commission for opinion polls of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

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

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

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

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

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

Editorial Council

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

Address of the Editorial Office:

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

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS. 2019. Vol. 63. No. 3

Printed in Russian, Belarusian and English languages

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

Sent for press 11.06.2019. Output 26.06.2019. Format 60×84¹/₈. Offset paper.
Digital press. Printed sheets 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 142 copies. Order 151.
Price: individual subscription – 11,74 BYN, departmental subscription – 28,19 BYN.

Publisher and printing execution:

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

- Матус П. П., Ле Минь Хиеу, Пылак Д.** Разностные схемы для квазилинейных параболических уравнений со смешанными производными..... 263
- Липницкий А. В.** О неустойчивости линейных дифференциальных систем Миллионщикова, зависящих от вещественного параметра 270

ФИЗИКА

- Курочкин Ю. А.** Когерентные состояния, связанные с двумерными эллиптическим и гиперболическим уравнениями 278
- Ивашкевич А. В., Овсюк Е. М., Кисель В. В., Редьков В. М.** Сферические решения уравнения для частицы со спином 3/2 (на англ. яз.) 282

ХИМИЯ

- Пашковский Ф. С., Корнеев Д. И., Лахвич Ф. А.** Синтоны для новых 11-дезоксидеокси-3-окса-3,7-интер-м-фениленовых аналогов простагландинов 291
- Грачек В. И., Поликарпов А. П., Шункевич А. А., Марцынкевич Р. В., Исакович О. И.** Синтез и исследование свойств нового хелатного сорбента для очистки воды 298
- Манжелесова Н. Е., Литвиновская Р. П., Полянская С. Н., Корытько Л. А., Савочка О. П.** Защитное действие салицилатов брассиностероидов на растения ярового ячменя, подвергнутые биотическому стрессу.... 304

БИОЛОГИЯ

- Баранов О. Ю., Кирьянов П. С., Пантелеев С. В., Можаровская Л. В., Падутов А. В., Разумова О. А., Падутов В. Е.** Анализ структурно-функциональной организации хлоропластного генома карельской березы на основании данных высокопроизводительного секвенирования..... 312
- Савченко Г. Е., Бачище Т. С., Кабашникова Л. Ф.** Влияние экзогенного β -1,3-глюкана на величину pH апопласта и цитоплазмы в тканях здоровых и инфицированных *Bipolaris sorociniana* (Sacc.) Shoem. проростках ячменя (*Hordeum vulgare* L.) 317
- Смольская О. С., Жукова А. А., Адамович Б. В.** Спектральные характеристики автотрофной компоненты взвешенного вещества в озерах Национального парка «Нарочанский»..... 325

МЕДИЦИНА

- Солтанов В. В., Комаровская Л. М.** Интероцептивные влияния глутамата натрия и пищевых добавок на активность гладких мышц желудка, кишечника и сердечную деятельность крыс 331
- Семак Г. Р., Захарова В. А., Клецкий С. К., Летковская Т. А., Жерко И. Ю.** Иммуногистохимические доказательства эффективности гиалуроновой кислоты в лечении кератопатий 343

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Матвеев А. В., Рылова Т. Б., Демидова С. В., Якубовская Т. В.** Изменения в стратиграфических схемах неогеновых и четвертичных отложений Беларуси в связи с пересмотром границы между системами 350

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Дьячкова Л. Н., Витязь П. А., Ильющенко А. Ф., Воронецкая Л. Я., Лецко А. И., Парницкий Н. М.** Влияние ультрадисперсной добавки алюминиды железа на структуру и свойства порошковых материалов на основе железа и меди 360
- Дихтиевская Л. В., Лабкович О. Н., Шевчук В. В.** Получение бишофита особой степени чистоты на основе термогидролизных оксида магния и соляной кислоты 370
- Базров Б. М., Хейфец М. Л.** Метод представления изделия как объекта цифровизации производства структурированным множеством модулей 377

CONTENTS*MATHEMATICS*

- Matus P. P., Le Minh Hieu, Pylak D.** Difference schemes for quasi-linear parabolic equations with mixed derivatives..... 263
- Lipnitskii A. V.** On the instability of the Millionshchikov linear systems depending on a real parameter..... 270

PHYSICS

- Kurochkin Yu. A.** Coherent states associated with two-dimensional elliptic and hyperbolic equations..... 278
- Ivashkevich A. V., Ovsiyuk E. M., Kisel V. V., Red'kov V. M.** Spherical solutions of the wave equation for a spin 3/2 particle 282

CHEMISTRY

- Pashkovsky F. S., Korneev D. I., Lakhvich F. A.** Synthons for new 11-deoxy-3-oxa-3,7-inter-*m*-phenylene prostaglandin analogues..... 291
- Grachek V. I., Polikarpov A. P., Shunkevich A. A., Martsynkevich R. V., Isakovich O. I.** Synthesis and investigation of properties of new chelate sorbent for water purification 298
- Manzhalesava N. E., Litvinovskaya R. P., Poljanskaja S. N., Karytsko L. A., Savachka A. P.** Protective effect of brasinosteroid salicylates on spring barley plants exposed to biotic stress 304

BIOLOGY

- Baranov O. Yu., Kiryanov P. S., Pantelev S. V., Mozharovskaya L. V., Padutov A. V., Razumova O. A., Padutov V. E.** Analysis of structural and functional organization of the curly birch chloroplast genome based on the next-generation sequencing data 312
- Savchenko G. E., Bachyshcha T. S., Kabashnikova L. F.** Influence of exogenous β -1,3-glucane on the pH level of apoplast and cytoplasm in healthy and *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem. seedlings of barley (*Hordeum vulgare* L.)-infected tissues 317
- Smolskaya V. S., Zhukava H. A., Adamovich B. V.** Spectral characteristics of the autotrophic component of suspended matter in the lakes of the National Park "Narochansky" 325

MEDICINE

- Soltanov V. V., Komarovskaya L. M.** Influences of sodium glutamate and food additives on the activity of smooth muscles of the stomach, the intestines and the cardiac activity of rats..... 331
- Semak G. R., Zakharova V. A., Kletsy S. K., Letkovskaya T. A., Zherko I. Yu.** Immunohistochemical proofs of the efficiency of hyaluronic acid in keratopathy treatment 343

EARTH SCIENCES

- Matveyev A. V., Rylova T. B., Demidova S. V., Yakubovskaya T. V.** Changes in stratigraphic charts of neogene and quaternary deposits of Belarus due to the revision of the boundary between systems 350

TECHNICAL SCIENCES

- Dyachkova L. N., Vityaz P. A., Ilyushchenko A. Ph., Voronetskaya L. J., Letsko A. I., Parnitsky N. M.** Influence of the ultrafine iron aluminide additive on the structure and properties of iron and copper powder materials..... 360
- Dikhtievskaya L. V., Labkovich O. N., Shevchuk V. V.** Obtaining high-purity bishophite based on thermohydrolysis magnesium oxide and hydrochloric acid 370
- Bazrov B. M., Kheifetz M. L.** Method of presenting a product as an object of digitalization of manufacturing by a structured set of modules 377

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

МАТЕМАТИКА
MATHEMATICS

УДК 519.63
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-263-269>

Поступило в редакцию 17.12.2018
Received 17.12.2018

Член-корреспондент П. П. Матус^{1,2}, Ле Минь Хиеу³, Д. Пылак²

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

²*Католический университет Люблина, Люблин, Польша*

³*Университет экономики, Университет Дананга, Дананг, Вьетнам*

**РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ КВАЗИЛИНЕЙНЫХ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ
УРАВНЕНИЙ СО СМЕШАННЫМИ ПРОИЗВОДНЫМИ**

Аннотация. Настоящая работа посвящена построению монотонных разностных схем второго порядка точности для двумерного квазилинейного параболического уравнения со смешанными производными. Получены двусторонние оценки решения конкретных разностных схем для исходной задачи, которые полностью согласованные с аналогичными оценками решения дифференциальной задачи, а также доказана важная априорная оценка в равномерной норме C . Полученные оценки применяются для доказательства сходимости разностных схем в сеточной норме L_2 .

Ключевые слова: уравнение со смешанными производными, принцип максимума, равномерная сетка, монотонная разностная схема, двусторонние оценки

Для цитирования. Матус, П. П. Разностные схемы для квазилинейных параболических уравнений со смешанными производными / П. П. Матус, Ле Минь Хиеу, Д. Пылак // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 263–269. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-263-269>

Corresponding Member Piotr P. Matus^{1,2}, Le Minh Hieu³, Dorota Pylak²

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

²*Institute of Mathematics and Computer Science The John Paul II Catholic University of Lublin, Lublin, Poland*

³*University of Economics, University of Danang, Danang, Vietnam*

**DIFFERENCE SCHEMES FOR QUASI-LINEAR PARABOLIC EQUATIONS
WITH MIXED DERIVATIVES**

Abstract. The present paper is devoted to constructing second-order monotone difference schemes for two-dimensional quasi-linear parabolic equation with mixed derivatives. Two-sided estimates of the solution of specific difference schemes for the original problem are obtained, which are fully consistent with similar estimates of the solution of the differential problem, and the *a priori* estimate in the uniform norm of C is proved. The estimates obtained are used to prove the convergence of difference schemes in the grid norm of L_2 .

Keywords: equation with mixed derivatives, maximum principle, uniform grid, monotone difference scheme, two-sided estimates

For citation: Matus P. P., Le Minh Hieu, Pylak D. Difference schemes for quasilinear parabolic equations with mixed derivatives. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 263–269 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-263-269>

Введение. В теории разностных схем [1; 2] принцип максимума применяется для исследования устойчивости и сходимости разностного решения в равномерной норме. Вычислительные методы, удовлетворяющие принципу максимума, принято называть монотонными [1; 2]. Монотонные схемы играют важную роль в вычислительной практике. Они позволяют получать численное решение без осцилляций даже в случае негладких решений [3].

Проблемы разработки разностных схем для уравнений со смешанными производными были изучены в [4–6]. В [7] для эллиптических уравнений со смешанными производными используются новые монотонные и консервативные разностные схемы как для знакопостоянного, так и для знакопеременного коэффициентов. В [8] для нелинейной задачи со смешанными производными в недивергентном виде построены и исследованы разностные схемы и реализующий ее итерационный процесс. Установлены согласованные с гладкостью искомого решения оценки скорости сходимости разностных схем в сеточной норме $W_{2,0}^2(\omega)$.

В настоящей работе рассмотрена начально-краевая задача для квазилинейного параболического уравнения с неограниченной нелинейностью [9]. На основе комбинации двух разностных схем второго порядка аппроксимации [10] построены и исследованы схемы, удовлетворяющие принципу максимума при произвольных знакопеременных коэффициентах смешанных производных. Для канонической формы разностной схемы общего вида доказаны двусторонние оценки сеточного решения через входные данные задачи без предположения об их знакоопределенности [11]. При помощи этих результатов получены двусторонние оценки решения конкретных разностных схем для исходной задачи, которые полностью согласованы с аналогичными оценками решения дифференциальной задачи, а также доказана важная априорная оценка в равномерной норме C . Полученные оценки применяются для доказательства сходимости разностных схем в сеточной норме L_2 . Все теоретические результаты получены только в предположении на входные данные дифференциальной задачи.

Вспомогательные результаты. Пусть Ω_h – конечное множество узлов (сетка) в некоторой ограниченной области n -мерного евклидова пространства, $x \in \Omega_h$ – точка сетки Ω_h . Рассмотрим уравнение

$$A(x)y(x) = \sum_{\xi \in M'(x)} B(x, \xi)y(\xi) + F(x), \quad x \in \Omega_h, \quad (1)$$

называемое канонической формой записи разностной схемы. Здесь $M'(x) = M(x) \setminus x$, $M(x)$ – шаблон схемы. Будем предполагать выполнение обычных условий положительности коэффициентов

$$A(x) > 0, \quad B(x, \xi) > 0, \quad \forall \xi \in M'(x), \quad (2)$$

$$D(x) = A(x) - \sum_{\xi \in M'(x)} B(x, \xi) > 0, \quad \forall \xi \in M'(x). \quad (3)$$

Для получения двусторонней оценки решения разностной схемы более удобной является следующая:

Л е м м а [11]. Пусть выполнены условия положительности коэффициентов (2), (3). Тогда максимальное и минимальное значения решения разностной схемы (1) принадлежат интервалу изменения входных данных

$$\min_{x \in \Omega_h} \frac{F(x)}{D(x)} \leq y(x) \leq \max_{x \in \Omega_h} \frac{F(x)}{D(x)}, \quad x \in \Omega_h.$$

С л е д с т в и е [1]. Пусть выполнены условия леммы. Тогда для решения разностной задачи (1) имеет место оценка в сеточном аналоге нормы C

$$\|y\|_C = \max_{x \in \Omega_h} |y(x)| \leq \left\| \frac{F}{D} \right\|_C.$$

Постановка задачи и двусторонние оценки точного решения. Пусть $\bar{G} = \{0 \leq x_\alpha \leq l_\alpha, \alpha = 1, 2\}$ – прямоугольник с границей Γ , $x = (x_1, x_2)$. Требуется найти непрерывную функцию $u(x, t)$, удовлетворяющую в $\bar{Q}_T = \bar{G} \times [0, T]$ начально-краевой задаче для квазилинейного параболического уравнения со смешанными производными

$$\frac{\partial u}{\partial t} = Lu + f(x, t), \quad x \in G, \quad t \in (0, T], \quad u(x, 0) = u_0(x), \quad u|_\Gamma = \mu(x, t), \quad (4)$$

$$Lu = \sum_{\alpha, \beta=1}^2 L_{\alpha\beta}u, \quad L_{\alpha\beta}u = \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(k_{\alpha\beta}(u) \frac{\partial u}{\partial x_\beta} \right). \quad (5)$$

Предполагаются выполненными следующие условия эллиптичности:

$$c_1 \sum_{\alpha=1}^2 \xi_\alpha^2 \leq \sum_{\alpha, \beta=1}^2 k_{\alpha\beta}(u) \xi_\alpha \xi_\beta \leq c_2 \sum_{\alpha=1}^2 \xi_\alpha^2, \quad \forall u \in \bar{D}_u, \quad (6)$$

$$\bar{D}_u = \{u(x, t) : m_1 \leq u(x, t) \leq m_2, (x, t) \in \bar{Q}_T, m_1, m_2 - \text{const}\},$$

где $c_1 > 0, c_2 > 0$ – постоянные, а $\xi = (\xi_1, \xi_2)$ – любой вектор. Из (6) в частности следует, что

$$0 < c_1 \leq k_{\alpha\alpha}(u) \leq c_2, \quad \forall u \in [m_1, m_2], \quad \alpha = 1, 2.$$

Далее предполагаем, что решение задачи (4)–(6) существует единственно, а все входящие в уравнение (4) коэффициенты и искомая функция обладают непрерывными ограниченными производными необходимого по ходу изложения порядка.

Пусть $Q_{t_1} = \{(x, t) \in Q_T : t \leq t_1\}$. Тогда имеет место следующий результат.

Т е о р е м а 1 [12]. Для решения $u(x, t)$ задачи (4)–(6) в любой точке $(x, t_1) \in \bar{Q}_T$ имеет место двусторонняя оценка

$$u(x, t_1) \geq m_1 = \sup_{\lambda > 0} \min \left\{ 0, \min_{Q_{t_1}} \{\mu(x, t), u_0(x)\} e^{\lambda(t_1-t)}, \frac{1}{\lambda} \min_{Q_{t_1}} (f(x, t) e^{\lambda(t_1-t)}) \right\}, \quad (7)$$

$$u(x, t_1) \leq m_2 = \inf_{\lambda > 0} \max \left\{ 0, \max_{Q_{t_1}} \{\mu(x, t), u_0(x)\} e^{\lambda(t_1-t)}, \frac{1}{\lambda} \max_{Q_{t_1}} (f(x, t) e^{\lambda(t_1-t)}) \right\}. \quad (8)$$

Разностная схема. На отрезке $[0, T]$ введем в рассмотрение равномерную с шагом τ сетку по времени $\bar{\omega}_\tau = \{t_n = n\tau, n = 0, 1, \dots, N_0, \tau N_0 = T\} = \omega_\tau \cup T$, а в прямоугольнике \bar{G} введем равномерную по каждому направлению x_α сетку $\bar{\omega}_h = \omega_h \cup \gamma_h, \gamma_h$ – множество граничных узлов,

$$\bar{\omega}_h = \{x_i = (x_1^{(i_1)}, x_2^{(i_2)}), x_\alpha^{(i_\alpha)} = i_\alpha h_\alpha, i_\alpha = 0, 1, \dots, N_\alpha, h_\alpha N_\alpha = l_\alpha, \alpha = 1, 2\}.$$

Для простоты будем использовать безындексные обозначения для независимых переменных $x = x_i, x_\alpha = x_\alpha^{i_\alpha}, t = t_n, \hat{t} = t_{n+1}$, и для сеточных функций

$$g = g(x_1^{i_1}, x_2^{i_2}, t_n) = g(x, t), \quad g^{\pm 1_1} = g_{i_1 \pm 1, i_2}, \quad g^{\pm 1_2} = g_{i_1, i_2 \pm 1},$$

$$\hat{g} = g^{n+1} = g(x, t_{n+1}), \quad g_{\bar{x}_\alpha} = \frac{g - g^{(-1_\alpha)}}{h_\alpha}, \quad g_{x_\alpha} = \frac{g^{(+1_\alpha)} - g}{h_\alpha}.$$

На равномерной сетке $\omega = \omega_h \times \omega_\tau$ дифференциальную задачу (4) аппроксимируем чисто неявной разностной схемой

$$y_t = \sum_{\alpha=1}^2 \Lambda_{\alpha\alpha} \hat{y} + \sum_{\substack{\alpha, \beta=1 \\ \alpha \neq \beta}}^2 \Lambda_{\alpha\beta} \hat{y} + \varphi, \quad (9)$$

$$y(x, 0) = u_0(x), \quad x \in \omega_h, \quad \hat{y}|_{\gamma_h} = \mu(x, t), \quad x \in \gamma_h, \quad (10)$$

где

$$\Lambda_{\alpha\alpha} \hat{y} = (a_{\alpha\alpha}(y) \hat{y}_{\bar{x}_\alpha})_{x_\alpha} = \frac{a_{\alpha\alpha}^{(+1_\alpha)}(y) (\hat{y}^{(+1_\alpha)} - y) - a_{\alpha\alpha}(y) (y - \hat{y}^{(-1_\alpha)})}{h_\alpha^2},$$

$$\Lambda_{\alpha\beta} \hat{y} = 0, 5[(k_{\alpha\beta}^-(y) \hat{y}_{\bar{x}_\beta})_{x_\alpha} + (k_{\alpha\beta}^-(y) \hat{y}_{x_\beta})_{\bar{x}_\alpha} + (k_{\alpha\beta}^+(y) \hat{y}_{x_\beta})_{x_\alpha} + (k_{\alpha\beta}^+(y) \hat{y}_{\bar{x}_\beta})_{\bar{x}_\alpha}], \quad \alpha \neq \beta,$$

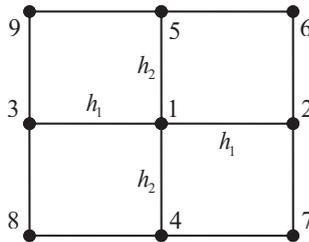
$$a_{\alpha\alpha}^{(+1\alpha)}(y) = \frac{k_{\alpha\alpha}(y^{(+1\alpha)}) + k_{\alpha\alpha}(y)}{2}, \quad a_{\alpha\alpha}(y) = \frac{k_{\alpha\alpha}(y^{(-1\alpha)}) + k_{\alpha\alpha}(y)}{2},$$

$$k_{\alpha\beta}^+ = 0,5(k_{\alpha\beta} + |k_{\alpha\beta}|) \geq 0, \quad k_{\alpha\beta}^- = 0,5(k_{\alpha\beta} - |k_{\alpha\beta}|) \leq 0, \quad \alpha \neq \beta,$$

$$k_{\alpha\beta}^+ + k_{\alpha\beta}^- = k_{\alpha\beta}, \quad k_{\alpha\beta}^+ - k_{\alpha\beta}^- = |k_{\alpha\beta}|, \quad \varphi = \hat{f}, \quad y_t = (y^{n+1} - y^n) / \tau.$$

Нетрудно показать, что разностная схема (9), (10) имеет второй порядок аппроксимации по пространственным переменным и первый – по временной.

Монотонность, двусторонние и априорные оценки. Для применения принципа максимума схему (9) приведем к каноническому виду (1) и проверим достаточные условия на коэффициенты (2), (3).



В случае знакопеременных коэффициентов $k_{\alpha\beta}(u)$ шаблон схемы 9-точечный и состоит из узлов, изображенных на рисунке. Узлы шаблона пронумеруем согласно рисунку. Тогда для схемы (9) получим

$$\sum_{\xi \in M'(x)} B^n(x, \xi) = \sum_{j=2}^9 B_j^n.$$

Для того чтобы выписать коэффициенты A^n , B^n , F^n , необходимо записать схему (9) в индексной форме. После элементарных преобразований находим

$$B_2^n = \tau \left(\frac{k_{11}(y_1^n) + k_{11}(y_2^n)}{2h_1^2} - \frac{|k_{12}(y_2^n)| + |k_{21}(y_1^n)|}{2h_1h_2} \right),$$

$$B_3^n = \tau \left(\frac{k_{11}(y_1^n) + k_{11}(y_3^n)}{2h_1^2} - \frac{|k_{12}(y_3^n)| + |k_{21}(y_1^n)|}{2h_1h_2} \right),$$

$$B_4^n = \tau \left(\frac{k_{22}(y_1^n) + k_{22}(y_4^n)}{2h_2^2} - \frac{|k_{12}(y_1^n)| + |k_{21}(y_4^n)|}{2h_1h_2} \right),$$

$$B_5^n = \tau \left(\frac{k_{22}(y_1^n) + k_{22}(y_5^n)}{2h_2^2} - \frac{|k_{12}(y_1^n)| + |k_{21}(y_5^n)|}{2h_1h_2} \right),$$

$$B_8^n = \tau \frac{k_{12}^+(y_3^n) + k_{21}^+(y_4^n)}{2h_1h_2} \geq 0, \quad B_9^n = -\tau \frac{k_{12}^-(y_3^n) + k_{21}^-(y_5^n)}{2h_1h_2} \geq 0,$$

$$A^n = 1 + \tau \left(k^n + \frac{k_{11}(y_1^n)}{h_1^2} - \frac{|k_{12}(y_1^n)| + |k_{21}(y_1^n)|}{h_1h_2} + \frac{k_{22}(y_1^n)}{h_2^2} \right) = 1 + \sum_{j=2}^9 B_j^n,$$

$$k^n = \frac{k_{11}(y_2^n) + k_{11}(y_3^n)}{2h_1^2} + \frac{k_{22}(y_4^n) + k_{22}(y_5^n)}{2h_2^2}, \quad D^n = A^n - \sum_{j=2}^9 B_j^n = 1, \quad F^n = y_1^n + \tau\varphi.$$

Пусть для шагов сетки h_1 и h_2 выполнены следующие условия через входные данные задачи:

$$\frac{c_3 + c_4}{2c_1} \leq \frac{h_1}{h_2} \leq \frac{2c_1}{c_3 + c_4}, \quad c_3 = \max_{u \in D_u} |k_{21}(u)|, \quad c_4 = \max_{u \in D_u} |k_{12}(u)|. \quad (11)$$

Неравенства (11) гарантируют выполнение условия монотонности (2), (3) (т. е. $A^n > 0$, $B_j^n \geq 0$, $j = 2, 3, 4, 5$). При помощи леммы доказана следующая теорема.

Т е о р е м а 2. Пусть выполнены условия (11). Тогда разностная схема (9), (10) безусловно монотонна (без ограничений на τ и h_α , $\alpha = 1, 2$) и для ее решения в любой точке $(x, t_n) \in \omega$ имеют место двусторонние оценки вида

$$y(x, t_n) \geq m_1^n = \sup_{\lambda > 0} \min \left\{ 0, \min_{\omega_{t_n}} e^{\lambda(t_n-t)} \{\mu(x, t), u_0(x)\}, \frac{\tau}{e^{\lambda\tau} - 1} \min_{\omega_{t_n}} f(x, t) e^{\lambda(t_n-t)} \right\}, \quad (12)$$

$$y(x, t_n) \leq m_2^n = \inf_{\lambda > 0} \max \left\{ 0, \max_{\omega_{t_n}} e^{\lambda(t_n-t)} \{\mu(x, t), u_0(x)\}, \frac{\tau}{e^{\lambda\tau} - 1} \max_{\omega_{t_n}} f(x, t) e^{\lambda(t_n-t)} \right\}. \quad (13)$$

З а м е ч а н и е 1. Верхняя и нижняя границы двусторонних оценок (12), (13) не зависят от величины коэффициентов диффузии $k_{\alpha\beta}(u)$, $\alpha, \beta = 1, 2$.

З а м е ч а н и е 2. Если матрица коэффициентов уравнения (4) имеет диагональное преобладание по строкам и столбцам: $k_{\alpha\alpha}(u) \geq |k_{\alpha\beta}(u)|$, $\forall u \in [m_1, m_2]$, $\alpha, \beta = 1, 2$, $\alpha \neq \beta$, то можно, например, положить $h_1 = h_2 = h$ и условие (11) в этом случае всегда выполнено.

На основании принципа максимума обычным образом устанавливается и следующая важная априорная оценка в сильной норме C .

Т е о р е м а 3. Пусть выполнены условия (11). Тогда для решения разностной схемы (9), (10) при любом $t_n \in \omega_\tau$ верна априорная оценка

$$\|y(t_{n+1})\|_{\bar{C}} \leq \max \left\{ \|u_0\|_{\bar{C}}, \max_{1 \leq k \leq n+1} \|\mu(t_k)\|_{C_\gamma} \right\} + t_{n+1} \max_{1 \leq k \leq n+1} \|f(t_k)\|_C. \quad (14)$$

З а м е ч а н и е 3. Полученные выше результаты естественным образом обобщаются на p -мерные ($p \geq 2$ – любое число) параболические уравнения со смешанными производными.

З а м е ч а н и е 4. Так как

$$\frac{\tau}{e^{\lambda\tau} - 1} \leq \frac{1}{\lambda}, \quad \forall \lambda, \tau > 0,$$

то из (7), (8), (12), (13) имеем $m_1 \leq m_1^n$, $m_2^n \leq m_2$, и в этом смысле говорят, что разностные оценки наследуют свойства дифференциальной задачи.

Сходимость разностной схемы в сеточной норме L_2 . Когда удается получить двусторонние оценки решения разностных схем, то исследование сходимости приводит для линейаризованных вычислительных алгоритмов к линейной задаче для погрешности метода $z = y - u$.

Для простоты рассмотрим случай $k_{\alpha\beta}(u) \leq 0$, $u \in \bar{D}_u$, $\alpha \neq \beta$. Тогда разностная схема (9), (10) имеет следующий вид:

$$y_t = \sum_{\alpha, \beta=1}^2 \Lambda_{\alpha\beta} \hat{y} + \varphi, \quad y(x, 0) = u_0(x), \quad x \in \omega_h, \quad \hat{y}|_{\gamma_h} = \mu(x, t), \quad x \in \gamma_h, \quad (15)$$

где

$$\Lambda_{\alpha\beta} \hat{y} = 0, 5[(k_{\alpha\beta}(y) \hat{y}_{\bar{x}\beta})_{x_\alpha} + (k_{\alpha\beta}(y) \hat{y}_{x_\beta})_{\bar{x}_\alpha}].$$

Определим следующее скалярное произведение и соответствующую норму:

$$(u, v) = \sum_{i_1=1}^{N_1-1} \sum_{i_2=1}^{N_2-1} h_1 h_2 u_{i_1 i_2} v_{i_1 i_2}, \quad \|u\| = \sqrt{(u, u)}.$$

Имеет место следующее утверждение:

Т е о р е м а 4. Пусть выполнены условия (11). Тогда решение разностной схемы (15) сходится к точному решению дифференциальной задачи (4) и имеет место оценка точности метода

$$\|\hat{z}\| \leq C(h_1^2 + h_2^2 + \tau), \quad C = \text{const} > 0. \quad (16)$$

З а м е ч а н и е 5. Если отсутствуют смешанные производные оценки (12), (13), то (14), (16) уже выполнены без ограничений (11) на соотношения между h_1 и h_2 .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М., 1989. – 616 с.
2. Самарский, А. А. Численные методы / А. А. Самарский, А. А. Гулин. – М., 1989. – 432 с.
3. Матус, П. П. Монотонные разностные схемы для линейного параболического уравнения с граничными условиями смешанного типа / П. П. Матус, Во Тхи Ким Туен, Ф. Гаспар // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 5. – С. 18–22.
4. Arbogast, T. Mixed finite elements for elliptic problems with tensor coefficients as cell-centered finite differences / T. Arbogast, M. F. Wheeler, I. Yotov // SIAM J. Numer. Anal. – 1997. – Vol. 34, N 2. – P. 828–852. <https://doi.org/10.1137/s0036142994262585>
5. Crumpton, P. Discretization and multigrid solution of elliptic equations with mixed derivative terms and strongly discontinuous coefficients / P. Crumpton, G. Shaw, A. Ware // J. Comput. Phys. – 1995. – Vol. 116, N 2. – P. 343–358. <https://doi.org/10.1006/jcph.1995.1032>
6. Voigt, W. Finite-difference schemes for parabolic problems with first and mixed second derivatives / W. Voigt // Z. angew. Math. und Mech. – 1988. – Vol. 68, N 7. – P. 281–288. <https://doi.org/10.1002/zamm.19880680703>
7. Matus, P. Difference schemes for elliptic equations with mixed derivatives / P. Matus, I. Rybak // Comput. Meth. Appl. Math. – 2004. – Vol. 4, N 4. – P. 494–505. <https://doi.org/10.2478/cmam-2004-0027>
8. Лубышев, Ф. В. Согласованные оценки скорости сходимости в сеточной норме $W_{2,0}^2(\omega)$ разностных схем для нелинейных эллиптических уравнений со смешанными производными и решениями из $W_{2,0}^m(\Omega)$, $3 < m \leq 4$ / Ф. В. Лубышев, М. Э. Файрузов // ЖВМ и МФ. – 2017. – Т. 57, № 9. – С. 1444–1470.
9. Matus, P. On convergence of difference schemes for IBVP for quasilinear parabolic equations with generalized solutions / P. Matus // Comput. Meth. Appl. Math. – 2014. – Vol. 14, N 3. – P. 361–371. <https://doi.org/10.1515/cmam-2014-0008>
10. Shishkin, G. Grid approximation of the singular perturbation boundary-value problem for quasilinear parabolic equations in the case of the full degeneration on time variables / G. Shishkin // Kuznetsov Yu. A., ed. Numerical methods and mathematical modeling. – Moscow, 1992. – P. 103–128.
11. Матус, П. П. Принцип максимума для разностных схем с непостоянными входными данными / П. П. Матус, Л. М. Хиену, Л. Г. Волков // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2015. – Т. 59, № 5. – С. 13–17.
12. Ладыженская, О. А. Линейные и квазилинейные уравнения параболического типа / О. А. Ладыженская, В. А. Солонников, Н. Н. Уралцева. – М., 1967. – 736 с.

References

1. Samarskii A. A. *Theory of difference schemes*. Moscow, 1989. 616 p. (in Russian).
2. Samarskii A. A., Gulina A. A. *Numerical methods*. Moscow, 1989. 432 p. (in Russian).
3. Matus P. P., Vo Thi Kim Tuyen, Gaspar F. Monotone difference schemes for linear parabolic equations with mixed boundary conditions. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2014, vol. 58, no. 5, pp. 18–22 (in Russian).
4. Arbogast T., Wheeler M. F., Yotov I. Mixed finite elements for elliptic problems with tensor coefficients as cell-centered finite differences. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1997, vol. 34, no. 2, pp. 828–852. <https://doi.org/10.1137/s0036142994262585>
5. Crumpton P., Shaw G., Ware A. Discretization and multigrid solution of elliptic equations with mixed derivative terms and strongly discontinuous coefficients. *Journal of Computational Physics*, 1995, vol. 116, no. 2, pp. 343–358. <https://doi.org/10.1006/jcph.1995.1032>
6. Voigt W. Finite-difference schemes for parabolic problems with first and mixed second derivatives. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1988, vol. 68, no. 7, pp. 281–288. <https://doi.org/10.1002/zamm.19880680703>
7. Matus P., Rybak I. Difference schemes for elliptic equations with mixed derivatives. *Computational Methods in Applied Mathematics*, 2004, vol. 4, no. 4, pp. 494–505. <https://doi.org/10.2478/cmam-2004-0027>
8. Lubyshchev F. V., Fairuzov M. E. Consistent convergence rate estimates in the grid $W_{2,0}^2(\omega)$ norm for difference schemes approximating nonlinear elliptic equations with mixed derivatives and solutions from $W_{2,0}^m(\Omega)$, $3 < m \leq 4$. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2017, vol. 57, no. 9, pp. 1427–1452. doi.org/10.7868/S0044466917090083
9. Matus P. On convergence of difference schemes for IBVP for quasilinear parabolic equations with generalized solutions. *Computational Methods in Applied Mathematics*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 361–371. <https://doi.org/10.1515/cmam-2014-0008>
10. Shishkin G. Grid approximation of the singular perturbation boundary-value problem for quasilinear parabolic equations in the case of the full degeneration on time variables. Yu. A. Kuznetsov, ed. *Numerical methods and mathematical modeling*. Moscow, 1992, pp. 103–128.
11. Matus P. P., Hieu L. M., Vulkov L. G. Maximum principle for finite-difference schemes with non-constant input data. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2015, vol. 59, no. 5, pp. 13–17 (in Russian).
12. Ladyzhenskaya O. A., Solonnikov V. A., Ural'tseva N. N. *Linear and quasilinear equations of parabolic type*. Moscow, 1967. 736 p. (in Russian).

Информация об авторах

Матус Петр Павлович – член-корреспондент, д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт математики НАН Беларуси (ул. Сурганова, 11, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: matus@im.bas-net.by.

Ле Минь Хиеу – канд. физ.-мат. наук. Университет экономики, Университет Дананга (ул. Нгу Хань Шон, 71, 550000, Дананг, Вьетнам). E-mail: hieulm@due.edu.vn.

Пылак Дорота – канд. физ.-мат. наук. Католический университет Люблина (ул. Raclawickie, 14, 20-950, Люблин, Польша). E-mail: dorotab@kul.pl.

Information about the authors

Matus Petr Pavlovich – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief researcher. Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus (11, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: matus@im.bas-net.by.

Le Minh Hieu – Ph. D. (Physics and Mathematics). University of Economics, University of Danang (71, Ngu Han Sean Str., 550000, Danang, Vietnam). E-mail: hieulm@due.edu.vn.

Pylak Dorota – Ph. D. (Physics and Mathematics). Institute of Mathematics and Computer Science the John Paul II Catholic University of Lublin (14, Raclawickie Str., 20-950, Lublin, Poland). E-mail: dorotab@kul.pl.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 517.926.4

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-270-277>

Поступило в редакцию 30.01.2019

Received 30.01.2019

А. В. Липницкий*Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***О НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ
МИЛЛИОНЩИКОВА, ЗАВИСЯЩИХ ОТ ВЕЩЕСТВЕННОГО ПАРАМЕТРА***(Представлено академиком Н. А. Изобовым)*

Аннотация. Рассматриваются однопараметрические семейства линейных дифференциальных систем второго порядка, матрица коэффициентов которых зависит от вещественного параметра и представляет собой на каждом нечетном отрезке времени единичной длины диагональную матрицу, а за каждый четный отрезок времени матрица Коши системы осуществляет поворот на некоторый угол, аффинно зависящий от параметра. Ранее автором установлена положительность старшего показателя Ляпунова такой системы, рассматриваемого как функция параметра, на множестве положительной меры Лебега в случае, когда диагональная часть матрицы коэффициентов не зависит от параметра и отделена от нуля. В доказательстве этого результата существенно используются комплексные матрицы специального вида. В настоящей работе приводится другой способ доказательства данной теоремы, основанный на применении равенства Парсеваля для тригонометрических сумм. Помимо этого, рассмотрен частный случай описанных выше систем, характеризующийся тем, что диагональная часть матрицы коэффициентов не зависит от времени и достаточно велика, а углы поворота определяются максимальной степенью двойки, которая делит номер соответствующего отрезка времени. Для таких систем в случае непрерывной зависимости коэффициентов от параметра доказано существование такого его значения, при котором соответствующая система неустойчива.

Ключевые слова: линейная дифференциальная система, старший показатель Ляпунова, вещественный параметр, равенство Парсеваля

Для цитирования. Липницкий, А. В. О неустойчивости линейных дифференциальных систем Миллионщикова, зависящих от вещественного параметра / А. В. Липницкий // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 270–277. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-270-277>

Andrei V. Lipnitskii*Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***ON THE INSTABILITY OF THE MILLIONSHCHIKOV LINEAR SYSTEMS DEPENDING
ON A REAL PARAMETER***(Communicated by Academician Nikolai A. Izobov)*

Abstract. The present article considers one-parameter families of second-order linear differential systems with a coefficient matrix depending on the real parameter, which is a diagonal matrix at each odd time interval of unit length. The Cauchy matrix is the rotation matrix at each odd time interval, whereas the angle is the sum of a parameter value and some real number. Earlier, it has been proved that the upper Lyapunov exponent of each such a system, which is considered to be the function of parameter, is positive on the set of the positive Lebesgue measure if the diagonal part of the coefficient matrix is independent on a parameter and separated from zero. The proof of this result essentially uses a complex matrix of special type. In recent article, the author has given another way to prove this theorem based on implementing the Parseval equality for trigonometric sums. Besides, the author considers the special case of the above systems. Now the diagonal part of the coefficient matrix is time-independent and is sufficiently big, whereas the rotation angle is defined by a maximum degree of two that divides the number of the corresponding time interval. For such a system, in the case of a continuous coefficient dependence on a parameter it is proved that such a value exists, at which the corresponding system is unstable.

Keywords: linear differential system, upper Lyapunov exponent, real parameter, Parseval equality

For citation: Lipnitskii A. V. On the instability of the Millionschikov linear systems depending on a real parameter. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 270–277 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-270-277>

Рассмотрим однопараметрическое семейство линейных дифференциальных систем

$$\dot{x} = A_\mu(t)x, \quad x \in \mathbb{R}^2, \quad t \geq 0, \tag{1.}$$

с матрицами $A_\mu(t) := \begin{cases} d_k(\mu)\text{diag}[1, -1], & 2k - 2 \leq t < 2k - 1, \\ (\mu + b_k)J, & 2k - 1 \leq t < 2k, \end{cases}$ где $k \in \mathbb{N}$, $J = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$, и вещественным параметром μ ; условия, которым удовлетворяют числа $b_k \in \mathbb{R}$ и функции $d_k(\cdot): \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, будут указаны ниже.

В [1] доказано, что старший показатель Ляпунова системы (1_μ), рассматриваемый как функция параметра μ , положителен на множестве положительной меры Лебега в случае, когда $d_k(\cdot)$ не зависят от μ и выполнено условие $d_k(\mu) \equiv d_k \geq d > 0$, $k \in \mathbb{N}$. В доказательстве этого результата существенно используются комплексные матрицы специального вида. В настоящей работе приводится другой способ доказательства теоремы из [1], основанный на применении равенства Парсеваля для тригонометрических сумм.

Пусть $\alpha_n \in \mathbb{R}$, $n \in \mathbb{N}$, – произвольные числа. Положим

$$d_k(\mu) \equiv d(\mu) > 2^{20}, \quad b_{2^{n-1}(2k-1)} := \alpha_n, \quad k \in \mathbb{N}. \tag{2}$$

Обозначим через $X_{A_\mu}(t, s)$, $t, s \geq 0$, матрицу Коши системы (1_μ). Для любого $\varphi \in \mathbb{R}$ матрицу поворота на угол φ по часовой стрелке обозначим через $U(\varphi) \equiv \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}$.

Можно показать, что в случае, когда матрица $A_\mu(\cdot)$ определяется условиями (2), для любого $k \in \mathbb{N}$ справедливо равенство $X_{A_\mu}(2^{k+1}, 0) = U(\alpha_{k+1} - \alpha_k)X_{A_\mu}^2(2^k, 0)$.

Системы с коэффициентами, выбранными согласно (2), обладают рядом свойств, позволяющих строить однопараметрические семейства с различными асимптотическими характеристиками. В частности, если последовательность $\{\alpha_n\}_{n=1}^\infty$ сходится, то матрица $A_\mu(\cdot)$ есть равномерный по $t \geq 0$ предел последовательности периодических матриц. В. М. Миллионщиков использовал такие системы в [2; 3] (см. также [4]) для доказательства существования неправильных по Ляпунову линейных дифференциальных систем с предельно периодическими и квазипериодическими коэффициентами.

Предложенные в этих работах методы требуют получения оценок собственных значений и векторов матрицы Коши системы (1_μ). Критерий Е. А. Барабанова [5] правильности линейной системы, состоящий в точности ее сингулярных показателей, инициировал другой подход, состоящий в применении сингулярного представления матрицы Коши (см. (5_n) ниже).

В настоящей работе при выполнении условий (2) и в случае непрерывной функции $d(\cdot)$ доказано существование такого значения параметра $\mu \in \mathbb{R}$, при котором соответствующая система (1_μ) неустойчива.

Положим $\eta_1(\mu) = e^{d(\mu)}$, $\psi_1(\mu) := 0$. Для каждого $k \in \mathbb{N}$ определим рекуррентно вещественные числа $\eta_k \geq 1$ и ψ_k следующим образом. Обозначим $\xi_k := 2\psi_k + \alpha_k + \mu$. Поскольку $\eta_k \geq 1$ и, следовательно $\text{sh}(2 \ln \eta_k) \geq 0$, найдутся единственные $1 \leq \eta_{k+1} \in \mathbb{R}$ и $\varphi_k \in [-2^{-1}\pi, 2^{-1}\pi)$, такие что выполнены равенства

$$\text{sh} \ln \eta_{k+1} = (\text{sh}(2 \ln \eta_k)) |\cos \xi_k|, \tag{3}$$

$$\text{ctg} \varphi_k = \begin{cases} (\text{ch}(2 \ln \eta_k)) \text{ctg} \xi_k, & \sin \xi_k \neq 0, \\ 0, & \sin \xi_k = 0. \end{cases} \tag{4}$$

Наконец, полагаем $\psi_{k+1} = \psi_k + \frac{\varphi_k}{2} + \frac{\pi}{4}(1 - \text{sgn} \cos \xi_k)$.

Л е м м а 1. Для любых $n \in \mathbb{N}$, $\mu \in \mathbb{R}$ при выполнении условий (2) имеет место представление

$$Y_n := X_{A_\mu}(2^n - 1, 0) = U(\psi_n) \text{diag}[\eta_k, \eta_k^{-1}] U(\psi_n). \tag{5.}$$

Д о к а з а т е л ь с т в о. Зафиксируем произвольное $k \in \mathbb{N}$.

Из (3) и (4) вытекают равенства

$$\begin{aligned} \left(\frac{\operatorname{ch}(2 \ln \eta_k)}{\cos \varphi_k} \right)^2 &= (\operatorname{ch}^2(2 \ln \eta_k))(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_k) \stackrel{(4)}{=} (\operatorname{tg}^2 \xi_k) + \operatorname{ch}^2(2 \ln \eta_k) = \\ &= (1 + \operatorname{tg}^2 \xi_k) + \operatorname{sh}^2(2 \ln \eta_k) \stackrel{(3)}{=} \frac{1}{\cos^2 \xi_k} + \left(\frac{\operatorname{sh} \ln \eta_{k+1}}{\cos \xi_k} \right)^2 = \left(\frac{\operatorname{ch} \ln \eta_{k+1}}{\cos \xi_k} \right)^2. \end{aligned}$$

Поэтому, ввиду следующей из включения $\varphi_k \in [-2^{-1}\pi, 2^{-1}\pi)$ оценки

$$\cos \varphi_k \geq 0, \quad (6)$$

выполняется соотношение

$$\operatorname{ch}(\ln \eta_{k+1}) \cos \varphi_k = (\operatorname{ch}(2 \ln \eta_k)) |\cos \xi_k|. \quad (7)$$

В силу (4) и (6) справедливы равенства

$$\operatorname{sgn} \sin \varphi_k = (\operatorname{sgn} \cos \varphi_k) \operatorname{sgn} \operatorname{tg} \varphi_k \stackrel{(4), (6)}{=} \operatorname{sgn} \operatorname{tg} \xi_k = (\operatorname{sgn} \cos \xi_k) \operatorname{sgn} \sin \xi_k. \quad (8)$$

Вследствие (3) и (7) верны соотношения

$$\begin{aligned} (\operatorname{ch}(\ln \eta_{k+1}) \sin \varphi_k)^2 &= (\operatorname{ch}^2 \ln \eta_{k+1})(1 - \cos^2 \varphi_k) \stackrel{(7)}{=} 1 + (\operatorname{ch}^2 \ln \eta_{k+1}) - (\operatorname{ch}^2(2 \ln \eta_k)) \cos^2 \xi_k \stackrel{(3)}{=} \\ &\stackrel{(3)}{=} 1 + (\cos^2 \xi_k)(\operatorname{ch}^2(2 \ln \eta_k) - \operatorname{ch}^2(2 \ln \eta_k)) = \sin^2 \xi_k. \end{aligned}$$

Отсюда и из (8) вытекает равенство

$$(\operatorname{ch} \ln \eta_{k+1}) \sin \varphi_k = (\operatorname{sgn} \cos \xi_k) \sin \xi_k, \quad k \in \mathbb{N}. \quad (9)$$

Для любого $t \in [0, 2^k - 1)$ его целую часть $[t]$ можно единственным образом представить в виде $[t] = 2^{p(t)} l(t) - 1$, где $0 \leq p(t)$, $l(t) \in \mathbb{Z}$ и $l(t)$ не делится на 2. Если $p = 0$, то $A_\mu(t) = \operatorname{diag}[1, -1] = A_\mu(t + 2^k)$.

Так как $t < 2^k - 1$, то $p(t) < k$. Поэтому $2^{k-p(t)}$ делится на 2, и, следовательно, число $l(t) + 2^{k-p(t)}$ нечетно. Тогда, поскольку $[t + 2^k] = [t] + 2^k = 2^{p(t)}(l(t) + 2^{k-p(t)}) - 1$, выполняются равенства $p(t + 2^k) = p(t)$, $l(t + 2^k) = l(t) + 2^{k-p(t)}$. Отсюда в случае когда $p > 0$, ввиду (2), следуют соотношения $A_\mu(t) \stackrel{(2)}{=} (\mu + \alpha_{p(t)})J = (\mu + \alpha_{p(t+2^k)})J = A_\mu(t + 2^k)$.

В силу справедливого, таким образом, для любого $t \in [0, 2^k - 1)$ равенства $A_\mu(t + 2^k) = A_\mu(t)$ верно соотношение

$$X_{A_\mu}(2^{k+1} - 1, 2^k) = X_{A_\mu}(2^k - 1, 0) = Y_k. \quad (10)$$

Отсюда, с учетом (2), следуют равенства

$$Y_{k+1} = X_{A_\mu}(2^{k+1} - 1, 0) = X_{A_\mu}(2^{k+1} - 1, 2^k) X_{A_\mu}(2^k, 2^k - 1) X_{A_\mu}(2^k, 0) \stackrel{(2), (10)}{=} Y_k U(\mu + \alpha_k) Y_k. \quad (11)$$

Для любого $\delta \in \{-1, 1\}$, вследствие (3) и (7), выполняются соотношения

$$\begin{aligned} \eta \left| \cos \xi_k \right| &= \left| \cos \xi_k \right| (\operatorname{ch}(2 \ln \eta_k) + \delta \operatorname{sh}(2 \ln \eta_k)) \stackrel{(3), (7)}{=} (\cos \varphi_k) \operatorname{ch}(\ln \eta_{k+1}) + \delta \operatorname{sh} \ln \eta_{k+1} = \\ &= (\cos^2(\varphi_k / 2)) (\operatorname{ch}(\ln \eta_{k+1}) + \delta \operatorname{sh} \ln \eta_{k+1}) + (\sin^2(\varphi_k / 2)) (\delta \operatorname{sh}(\ln \eta_{k+1}) - \operatorname{ch} \ln \eta_{k+1}) = \\ &= \eta_{k+1}^\delta \cos^2(\varphi_k / 2) - \eta_{k+1}^{-\delta} \sin^2(\varphi_k / 2). \end{aligned} \quad (12)$$

Справедливы равенства $Y_1 = X_{A_\mu}(1, 0) = \operatorname{diag}[e^{d_0(\mu)}, e^{-d_0(\mu)}] = \operatorname{diag}[\eta_1, \eta_1^{-1}]$, влекущие за собой верность (5).

Предположим, что соотношение (5_n) справедливо для некоторого $n = k \in \mathbb{N}$. Тогда, в силу (11), выполняются равенства

$$Y_{k+1} \stackrel{(11)}{=} Y_k U(\zeta_k) Y_k \stackrel{(5_k)}{=} U(\psi_k) \text{diag}[\eta_k, \eta_k^{-1}] U(2\psi_k + \mu + \alpha_k) \text{diag}[\eta_k, \eta_k^{-1}] U(\psi_k). \quad (13)$$

Отсюда, ввиду (9) и (12), вытекают соотношения

$$\begin{aligned} U(-\psi_k) Y_{k+1} U(-\psi_k) &\stackrel{(13)}{=} \begin{pmatrix} \eta_k & 0 \\ 0 & \eta_k^{-1} \end{pmatrix} U(\xi_k) \begin{pmatrix} \eta_k & 0 \\ 0 & \eta_k^{-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_k^2 \cos \xi_k & -\sin \xi_k \\ \sin \xi_k & \eta_k^{-2} \cos \xi_k \end{pmatrix} \stackrel{(9),(12)}{=} \\ &\stackrel{(9),(12)}{=} (\text{sgn} \cos \xi_k) \begin{pmatrix} \eta_{k+1} \cos^2(\varphi_k / 2) - \eta_{k+1}^{-1} \sin^2(\varphi_k / 2) & -2^{-1}(\eta_{k+1} + \eta_{k+1}^{-1}) \sin \varphi_k \\ 2^{-1}(\eta_{k+1} + \eta_{k+1}^{-1}) \sin \varphi_k & \eta_{k+1}^{-1} \cos^2(\varphi_k / 2) - \eta_{k+1} \sin^2(\varphi_k / 2) \end{pmatrix} = \\ &= U\left(\frac{\pi}{2}(1 - \text{sgn} \cos \xi_k)\right) U\left(\frac{\varphi}{2}\right) \begin{pmatrix} \eta_{k+1} & 0 \\ 0 & \eta_{k+1}^{-1} \end{pmatrix} U\left(\frac{\varphi}{2}\right) = U(\psi_{k+1} - \psi_k) \begin{pmatrix} \eta_{k+1} & 0 \\ 0 & \eta_{k+1}^{-1} \end{pmatrix} U(\psi_{k+1} - \psi_k). \end{aligned}$$

Таким образом, имеет место соотношение (5_{k+1}). Отсюда, по индукции, следует справедливость равенства (5_n) для любого $n \in \mathbb{N}$. Лемма доказана.

Л е м м а 2. Для любой непрерывной функции $f(\cdot): [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, $a, b \in \mathbb{R}$, такой, что $f(a) \leq c < d \leq f(b)$, найдется отрезок $[p, q] \subset [a, b]$ такой, что выполняется равенство $f([p, q]) = [c, d]$.

Д о к а з а т е л ь с т в о. Обозначим $K_1 := \{s \in [a, b] : f(s) \leq c\}$.

Поскольку $a \in K_1$, существует $p := \sup K_1$. В силу непрерывности функции $f(\cdot)$ верно равенство

$$f(p) = c. \quad (14)$$

Положим $K_2 := \{s \in [p, b] : f(s) \geq d\}$. Поскольку, по условию леммы, $b \in K_2$, найдется $q := \inf K_2$. В силу непрерывности $f(\cdot)$ справедливо равенство

$$f(q) = d. \quad (15)$$

Обозначим $S := [p, q]$. Очевидно, имеет место включение

$$f(S) \subset [c, d]. \quad (16)$$

Из равенств (14) и (15), с учетом непрерывности функции $f(\cdot)$, по теореме о промежуточном значении имеем включение $f(S) \supset [c, d]$. Отсюда и из (16) следует равенство $f(S) = [c, d]$. Лемма доказана.

Т е о р е м а 1. Для любых $\alpha_n \in \mathbb{R}$, $n \in \mathbb{N}$ и любой непрерывной функции $d(\cdot)$ при выполнении условий (2) найдется $\mu \in \mathbb{R}$ такое, что старший характеристический показатель системы (1_μ) положителен.

Д о к а з а т е л ь с т в о. Для любых $\gamma \in \mathbb{R}$, $\varepsilon > 0$ обозначим

$$V_\varepsilon(\gamma) := \{\kappa \in [-2^{-1}\pi, 2^{-1}\pi] : |\sin(\kappa - \gamma)| < \sin \varepsilon\}.$$

Зафиксируем произвольное $0 \leq k \in \mathbb{Z}$.

Определим множество W_{k+1} равенствами

$$W_1 := [-2^{-1}\pi, 2^{-1}\pi], \quad W_{k+1} := [-2^{-1}\pi, 2^{-1}\pi] \setminus \left(\bigcup_{j=1}^k V_{2^{-j-2-k-1}}(\alpha_j - 2^{-1}\pi)\right), \quad k \geq 1.$$

Для любых $j \in \{1, \dots, k\}$, $\delta \in \{0, 1\}$ обозначим $\tilde{\beta}_{2j-\delta} := \alpha_j - 2^{-1}\pi + (1 - 2\delta)(2^{-j} - 2^{-k-1})$.

Для каждого $j \in \{1, \dots, 2k\}$ найдется единственное $\beta_j(k) \in (-2^{-1}\pi, 2^{-1}\pi]$, такое что $|\sin \beta_j(k)| = |\sin \tilde{\beta}_j(k)|$.

Положим $\beta_0(k) := -2^{-1}\pi$, $\beta_{2k+1}(k) := 2^{-1}\pi$.

Найдется перестановка σ множества $\{0, \dots, 2k+1\}$, для которой последовательность $\{\beta_{\sigma(j)}(k)\}_{j=0}^{2k+1} \subset (-2^{-1}\pi, 2^{-1}\pi]$ не убывает.

Граница ∂W_{k+1} множества W_{k+1} удовлетворяет включениям

$$\partial W_{k+1} \subset \{-2^{-1}\pi, 2^{-1}\pi\} \cup \left(\bigcup_{j=1}^k \partial V_{2^{-j}-2^{-k-1}}(\zeta_j - 2^{-1}\pi) \right) \subset \{\beta_j(k)\}_{j=0}^{2k+1}. \quad (17)$$

Для $j = \overline{0, 2k}$ обозначим

$$b_{j,k} := 2^{-1}(\beta_{\sigma(j)}(k) + \beta_{\sigma(j+1)}(k)), \quad c_{j,k} := 2^{-1}(\beta_{\sigma(j+1)}(k) - \beta_{\sigma(j)}(k)),$$

$$L_{j,k+1} := \{\zeta \in [-2^{-1}\pi, 2^{-1}\pi] : |\sin(\zeta - b_{j,k})| \leq \sin c_{j,k}\}, \quad I_k := \{j \in \{0, \dots, 2k\} : b_{j,k} \in W_{k+1}\}.$$

Справедливы равенства $L_{j,k+1} = [\beta_{\sigma(j)}, \beta_{\sigma(j+1)}]$, $j = \overline{0, 2k}$, влекущие в силу (17) за собой соотношение $W_k = \bigcup_{i \in I_k} L_{i,k+1}$.

Обозначим $s_k := \sum_{j=1}^{k-1} 2^{-j} j$, $s_1 := 0$.

Предположим, что для любого $n \in \mathbb{N}$, $n \leq k$, существует множество $M_k \subset \mathbb{R}$, представимое в виде объединения отрезков $M_{j,k} = [\mu_{2j-1}, \mu_{2j}] \subset \mathbb{R}$, $j \in I_{k-1}$, и удовлетворяющее соотношениям

$$\operatorname{sh} \ln \eta_k(\mu) \geq 2^{(9-s_k)2^k}, \quad \mu \in M_k, \quad (18_k)$$

$$\{\sin \psi_k(\mu) \mid \mu \in M_{j,k}\} = \{\sin \zeta \mid \zeta \in L_{j,k}\}, \quad j \in I_{k-1}, \quad (19_k)$$

и, в случае $k > 1$, включению

$$M_k := \bigcup_{j \in I_{k-1}} M_{j,k} \subset M_{k-1}. \quad (20_k)$$

В силу (19_k) для любого $\mu \in M_k$ имеет место включение $\xi_k(\mu) \in \mathbb{R} \setminus V_{2^{-k-1}}(\alpha_k - 2^{-1}\pi)$, влекущее за собой неравенства

$$|\cos \xi_k(\mu)| \geq \sin 2^{-k-1} \geq 2^{-k-2}. \quad (21_k)$$

Для любого $\mu \in M_k$ из (3), (18_k) и (21) вытекают оценки

$$\operatorname{sh} \ln \eta_{k+1}(\mu) \stackrel{(3)}{=} \operatorname{sh}(2 \ln \eta_k(\mu)) \stackrel{(21)}{\geq} 2^{-k-2} \operatorname{sh}(2 \ln \eta_k(\mu)) \stackrel{(18_k)}{\geq} 2^{(9-s_k)2^{k+1}-2k} \geq 2^{(9-s_{k+1})2^{k+1}},$$

т. е., выполняется (18_{k+1}).

Положим $S_k(\alpha) := \sum_{j=1}^k \alpha^j j$. Для любого $\alpha \in (-1, 1)$ имеем равенства $S_{+\infty}(\alpha) = (\sum_{j=1}^{\infty} \alpha^j)'_{\alpha} = ((1-\alpha)^{-1})'_{\alpha} = 2(1-\alpha)^{-2}$. Отсюда следуют соотношения $s_k \leq s_{+\infty} = \sum_{j=1}^{\infty} 2^{-j} j = S_{+\infty}(2^{-1}) = 8$. Из них, учитывая (18_k), получаем оценку

$$\operatorname{sh} \ln \eta_k(\mu) \geq 2^{2^k}. \quad (22_k)$$

Для любого $i \in I_k$ верно включение $V_{2^{-k-1}}(L_{i,k+1}) \subset W_k$. Тогда, поскольку $L_{i,k+1}$ – отрезок, найдется $j_i \in I_{k-1}$ такое, что выполняется соотношение

$$V_{2^{-k-1}}(L_{i,k+1}) \subset L_{j_i,k}. \quad (23_k)$$

Из (4), (21) и (22_k) следуют оценки

$$|\varphi_k(\mu)| \leq 2 |\sin \varphi_k(\mu)| \leq 2 |\operatorname{tg} \varphi_k(\mu)| \stackrel{(4)}{=} \frac{2 |\operatorname{tg} \xi_k(\mu)|}{\operatorname{ch} 2 \ln \eta_k(\mu)} \leq \frac{4}{\eta_k(\mu) |\cos \xi_k(\mu)|} \stackrel{(21), (22_k)}{\leq} \frac{1}{2^{k+1}}. \quad (24_k)$$

Отсюда вытекает включение

$$\psi_{k+1}(\mu_{2j-\delta,k}) \stackrel{(23)}{\in} V_{2^{-k-1}}(\psi_k(\mu_{2j-\delta,k})), \quad \delta = \overline{0, 1}. \quad (25_k)$$

В силу (23) имеем соотношения

$$b_{j_i,k-1} - c_{j_i,k-1} \stackrel{(22')}{\leq} b_{i,k} - c_{i,k} - 2^{-k-1} < b_{i,k} + c_{i,k} + 2^{-k-1} \stackrel{(23)}{\leq} b_{j_i,k-1} + c_{j_i,k-1},$$

Отсюда получаем оценку

$$|b_{i,k} - b_{j_i,k-1}| \leq c_{j_i,k-1} - c_{i,k} - 2^{-k-1}. \tag{26}$$

Из (19_k) следует соотношение

$$|\Psi_k(\mu_{2j-\delta,k}) - b_{j_i,k-1}| = c_{j_i,k-1}. \tag{27}$$

Тогда вследствие (25)–(27) справедливы неравенства

$$\begin{aligned} & |\Psi_{k+1}(\mu_{2j-\delta,k}) - b_{i,k}| \geq \\ & \geq |\Psi_k(\mu_{2j-\delta,k}) - b_{j_i,k-1}| - |\Psi_{k+1}(\mu_{2j-\delta,k}) - \Psi_k(\mu_{2j-\delta,k})| - |b_{i,k+1} - b_{j_i,k}| \stackrel{(25)-(27)}{\geq} c_{i,k}. \end{aligned} \tag{28}$$

Определим функцию $f(\cdot): \mathbb{R} \rightarrow [-1, 1]$ равенством $f(\mu) := \sin(\Psi_{k+1}(\mu) - b_{i,k})$. Обозначим $g(\mu) := f(\mu) \operatorname{sgn}(f(\mu_{2j,k}) - f(\mu_{2j-1,k}))$. Из (28) следуют оценки

$$g(\mu_{2j-1,k}) \leq -\kappa < 0 < \kappa \leq g(\mu_{2j,k}). \tag{29}$$

Так как функция $\eta_1(\cdot)$ непрерывна, то также непрерывна и $\varphi_{k+1}(\cdot)$, а следовательно, и функция $g(\cdot)$. Поэтому и в силу (29) функция $g(\cdot)$ удовлетворяет условиям леммы 2, в которой положено $[a, b] := [\mu_{2j-1,k}, \mu_{2j,k}]$, $[c, d] := [-\kappa, \kappa]$. Тогда, вследствие этой леммы, найдутся $\mu_{2i-1,k+1}, \mu_{2i,k+1} \in M_{j_i,k}$, $\mu_{2i-1,k+1} < \mu_{2i,k+1}$, такие что отрезок $M_{i,k+1} = [\mu_{2i-1,k+1}, \mu_{2i,k+1}]$ удовлетворяет соотношениям $g(M_{i,k+1}) = [-\kappa, \kappa] = \{\sin(\zeta - b_{i,k}) \mid \zeta \in L_{i,k+1}\}$, т. е. выполняется равенство (19_{k+1}). При этом включение $M_{i,k+1} \subset M_{j_i,k}$ влечет за собой соотношение (20_{k+1}).

Заметим, что в случае $k = 1$ справедливы равенства $I_0 = 1$, $L_{0,1} = [-2^{-1}\pi, 2^{-1}\pi]$, откуда, полагая $M_1 := M_{1,1} = [\mu_{1,1}, \mu_{1,2}] := [-2^{-1}\pi, 2^{-1}\pi]$, получаем равенства $\sin \xi_1(M_{1,1}) = \sin([- \pi + a_1, \pi + a_1]) = [-1, 1] = \sin L_1$, т. е. верно соотношение (19₁). В силу (2) выполняются оценки $\operatorname{sh} \ln \eta_1(\mu) = 2^{-1}(\eta_1(\mu) - \eta_1^{-1}(\mu)) \stackrel{(2)}{\geq} 2^{-1}(2^{20} - 2^{-20}) \geq 2^{18} = 2^{(9-s_1)2^1}$, означающие справедливость оценки (18₁).

По индукции, получаем справедливость соотношений (18_n), (19_n) и (20_n) для любого $1 < n \in \mathbb{N}$.

Из положительности меры Лебега множества W_k в силу (19_k) имеем соотношение $M_k \neq \emptyset$. Отсюда, с учетом включения (20_n), $n \in \mathbb{N}$, вытекает существование $\mu_{+\infty} \in M_{+\infty} := \lim_{k \rightarrow +\infty} M_k$.

Вследствие (5_n) и (22_n), с учетом формулы Ляпунова [6, с. 41] для старшего характеристического показателя системы (1_μ), верны оценки

$$\lambda_{\max}(A_{\mu_{+\infty}}) = \overline{\lim}_{t \rightarrow +\infty} t^{-1} \ln \|X_{A_{\mu_{+\infty}}}(t, 0)\| \geq \overline{\lim}_{t \rightarrow +\infty} 2^{-n} \ln \|X_{A_{\mu_{+\infty}}}(2^n, 0)\| \stackrel{(5_k), (22_k)}{\geq} 1.$$

Теорема доказана.

Т е о р е м а 2 [1]. Система (1_μ) имеет при любых $d_k \geq d > 0, k \geq 1$, положительный старший характеристический показатель $\lambda_2(A_\mu)$ для всех μ из некоторого множества J положительной меры Лебега.

Д о к а з а т е л ь с т в о. Обозначим $I := \operatorname{diag}[1, -1]$. Для любого $\varphi \in \mathbb{R}$ согласно (14) из [7] справедливо равенство

$$IU(\varphi) = U(-\varphi)I. \tag{30}$$

Для всех $k \in \mathbb{N}_0$ выполняются соотношения (E обозначает единичную матрицу)

$$X_A(2k-1, 2k-2) = \operatorname{diag}[e^{d_k}, e^{-d_k}] = \operatorname{ch}(d_k)E + \operatorname{sh}(d_k)I, \tag{31_k}$$

$$X_A(2k, 2k-1) = U(\mu + b_k), \tag{32_k}$$

Обозначим через H класс матриц B , представимых в виде $B = \sum_{j=1}^n \beta_j U(\gamma_j)$, $\beta_j, \gamma_j \in \mathbb{R}, j = \overline{1, n}$, $n = n(B) \in \mathbb{N}$. Обозначим также $\kappa_k := \prod_{j=1}^k \operatorname{ch} d_j, k \in \mathbb{N}, \kappa_0 := 1, \tilde{b}_k := \sum_{j=1}^k b_j$.

Предположим, что для некоторого $k \in \mathbb{N}$ найдутся матрицы $B_{k,j}, C_{k,j} \in H$, $j = \overline{1-k, k-2}$, такие что имеет место равенство

$$X_A(2k-1, 0) = (\kappa_k E + \kappa_{k-1} \text{sh}(d_k) I) U(\mu(k-1) + \tilde{b}_{k-1}) + \sum_{j=1-k}^{k-2} (U(j\mu) B_{k,j} + IU(j\mu) C_{k,j}). \quad (33_k)$$

В силу (30) для любого $j = \overline{1-k, k-1}$ справедливы соотношения

$$U((\mu + b_k)) IU(j\mu) \stackrel{(30)}{=} IU(-\mu - b_k) U(j\mu) = IU(\mu(j-1)) U(-b_k). \quad (34)$$

Отсюда, поскольку $I^2 = E$, следует равенство

$$(\text{ch}(d_{k+1}) E + \text{sh}(d_{k+1}) I) U((\mu + b_k)) IU(j\mu) \stackrel{(34)}{=} (\text{ch}(d_{k+1}) E + \text{sh}(d_{k+1}) I) U(\mu(j-1)) U(-b_k). \quad (35)$$

Тогда в силу (30), (31_{k+1}) и (32_k) верны соотношения

$$\begin{aligned} X_A(2k+1, 0) &= X_A(2k+1, 2k) X_A(2k, 2k-1) X_A(2k-1, 0) \stackrel{(31_{k+1}), (32_k)}{=} \\ &\stackrel{(31_{k+1}), (32_k)}{=} (\text{ch}(d_{k+1}) E + \text{sh}(d_{k+1}) I) U((\mu + b_k)) X_A(2k-1, 0) \stackrel{(33_k), (35)}{=} \\ &\stackrel{(33_k), (35)}{=} (\text{ch}(d_{k+1}) E + \text{sh}(d_{k+1}) I) \left(\kappa_k U(k\mu + \tilde{b}_k) + \sum_{j=1-k}^{k-2} (U(\mu(j+1)) U(b_k) B_{k,j}) \right) + \\ &+ (\text{ch}(d_{k+1}) E + \text{sh}(d_{k+1}) I) \left(\kappa_{k-1} \text{sh}(d_k) U(\mu(k-2)) U(\tilde{b}_{k-1} - b_k) + \sum_{j=1-k}^{k-2} (U(\mu(j-1)) U(-b_k) C_{k,j}) \right). \end{aligned}$$

Отсюда видно, что найдутся матрицы $B_{k+1,j}, C_{k+1,j} \in H$, $j = \overline{k, k-1}$, для которых выполняется равенство (33_{k+1}). Учитывая следующее из (33_k) соотношение (33_k), по индукции получаем, что равенство (33_n) справедливо для любого $n \in \mathbb{N}$.

Для любой матрицы $\tilde{B} = \sum_{j=1}^n \beta_j U(\gamma_j) \in H$ имеем

$$\tilde{B} U(\mu(1-k)) = \sum_{j=1}^n (\beta_j U(\gamma_j) U(\mu(1-k))) = \sum_{j=1}^n (\beta_j U(\mu(1-k)) U(\gamma_j)) = U(\mu(1-k)) \tilde{B}. \quad (36)$$

Так как

$$U(\tau) = (\cos \tau) E + (\sin \tau) J, \quad \tau \in \mathbb{R}, \quad (37)$$

то, вследствие (30), выполняются соотношения

$$IU(\tau) \stackrel{(30)}{=} U(-\tau) I \stackrel{(37)}{=} ((\cos \tau) E - (\sin \tau) J) I. \quad (38)$$

Обозначим $F_k := \kappa_k E + \kappa_{k-1} (d_k) I$, $k \in \mathbb{N}$. В силу (33_k) и (36)–(38) справедливы соотношения

$$\begin{aligned} &\int_0^{2\pi} X_A(2k-1, 0) U(\mu(1-k)) d\mu \stackrel{(33_k), (36)}{=} \\ &\stackrel{(33_k), (36)}{=} \int_0^{2\pi} \left(F_k U(\tilde{b}_{k-1}) + \sum_{j=1-k}^{k-2} (U(\mu(j-k+1)) B_{k,j} + IU(\mu(j-k+1)) C_{k,j}) \right) d\mu \stackrel{(37), (38)}{=} \\ &\stackrel{(37), (38)}{=} \int_0^{2\pi} (F_k U(\tilde{b}_{k-1})) d\mu + \sum_{j=1-k}^{k-2} \left(\left(\int_0^{2\pi} \cos(\mu(j-k)) d\mu \right) (B_{k,j} + IC_{k,j}) + \right. \\ &\left. + \left(\int_0^{2\pi} \sin(\mu(j-k)) d\mu \right) J (B_{k,j} - IC_{k,j}) \right) = 2\pi F_k U(\tilde{b}_{k-1}). \end{aligned} \quad (39)$$

Отсюда следуют равенства

$$\begin{aligned} &\int_0^{2\pi} \|X_A(2k-1, 0)\| d\mu = \int_0^{2\pi} \|X_A(2k-1, 0) U(\mu(1-k))\| d\mu \geq \\ &\geq \left\| \int_0^{2\pi} X_A(2k-1, 0) U(\mu(1-k)) d\mu \right\| \stackrel{(39)}{=} 2\pi \|F_k\| \geq 2\pi |\kappa_k + \kappa_{k-1} \text{sh } d_k| \geq 2\pi \kappa_k. \end{aligned} \quad (40)$$

Поэтому, с учетом вытекающей из возрастания функции $\text{ch}(\cdot)$ на промежутке $(0, +\infty)$ оценки $d_j \geq d$, $j \in \mathbb{N}$, выполняются соотношения

$$\int_{\mu=0}^{2\pi} \ln \|X_A(2n-1, 0)\| d\mu \stackrel{(40)}{=} \left(\ln(2\pi) + \sum_{j=1}^n \ln \text{ch} d_j \right) \geq \sum_{j=1}^n \ln \text{ch} d = n \ln \text{ch} d. \quad (41)$$

Предположим, что при почти всех $\mu \in \mathbb{R}$ старший характеристический показатель системы (1_μ) равен нулю. Тогда из (41), в силу леммы Фату [8, с. 324], имеем оценки

$$\begin{aligned} 0 &= \int_{\mu=0}^{2\pi} \lambda_{\max}(A_\mu) d\mu = \int_{\mu=0}^{2\pi} \overline{\lim}_{t \rightarrow +\infty} \frac{1}{t} \ln \|X_A(t, 0)\| d\mu \geq \\ &\geq \int_{\mu=0}^{2\pi} \overline{\lim}_{t \rightarrow +\infty} \frac{\ln \|X_A(2n-1, 0)\|}{2n-1} d\mu \\ &\geq \overline{\lim}_{t \rightarrow +\infty} \frac{1}{2n-1} \int_{\mu=0}^{2\pi} \ln \|X_A(2n-1, 0)\| d\mu \stackrel{(41)}{\geq} \frac{1}{2} \ln \text{ch} d > 0. \end{aligned}$$

Полученное противоречие и доказывает теорему.

Список использованных источников

1. Липницкий, А. В. Оценки снизу старшего характеристического показателя в однопараметрических семействах систем Миллионщикова / А. В. Липницкий // Тр. семинара им. И. Г. Петровского. – 2014. – Вып. 30. – С. 171–177.
2. Миллионщиков, В. М. Доказательство существования неправильных систем линейных дифференциальных уравнений с почти-периодическими коэффициентами / В. М. Миллионщиков // Дифференц. уравнения. – 1968. – Т. 4, № 3. – С. 391–396.
3. Миллионщиков, В. М. Доказательство существования неправильных систем линейных дифференциальных уравнений с квазипериодическими коэффициентами / В. М. Миллионщиков // Дифференц. уравнения. – 1969. – Т. 5, № 11. – С. 1979–1983; 1974. – Т. 10, № 3. – С. 569.
4. Липницкий, А. В. О решении В. М. Миллионщиковым проблемы Еругина // Дифференц. уравнения. – 2000. – Т. 36, № 12. – С. 1615–1620.
5. Барабанов, Е. А. Сингулярные показатели и критерии правильности линейных дифференциальных систем / Е. А. Барабанов // Дифференц. уравнения. – 2005. – Т. 41, № 2. – С. 147–157.
6. Изобов, Н. А. Введение в теорию показателей Ляпунова / Н. А. Изобов. – Минск, 2006. – 319 с.
7. Липницкий, А. В. Оценки отклонения решений линейных дифференциальных систем Миллионщикова от соответствующих тригонометрических сумм / А. В. Липницкий // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2016. – Т. 60, № 3. – С. 5–10.
8. Колмогоров, А. Н. Элементы теории функций и функционального анализа / А. Н. Колмогоров, С. В. Фомин. – М., 2004. – 572 с.

References

1. Lipnickij A. V. Lower bounds for the upper Lyapunov exponent in one-parameter families of Millionshchikov systems. *Trudy seminara imeni I. G. Petrovskogo = Proceedings of the I. G. Petrovsky seminar*, 2014, vol. 30, pp. 171–177 (in Russian).
2. Millionshchikov V. M. Proof of existence of irregular systems of linear differential equations with almost-periodic coefficients. *Differentsial'nye uravneniia = Differential Equations*, 1968, vol. 4, no. 3, pp. 391–396 (in Russian).
3. Millionshchikov V. M. Proof of existence of irregular systems of linear differential equations with quasi-periodic coefficients. *Differentsial'nye uravneniia = Differential Equations*, 1969, vol. 5, no. 11, pp. 1979–1983; 1974, vol. 10, no. 3, pp. 569 (in Russian).
4. Lipnickij A. V. On V. M. Millionshchikov's solution of the Erugin problem. *Differentsial'nye uravneniia = Differential Equations*, 2000, vol. 36, no. 12, pp. 1615–1620 (in Russian).
5. Barabanov E. A. Singular exponents and regularity criteria for linear differential systems. *Differentsial'nye uravneniia = Differential Equations*, 2005, vol. 41, no. 2, pp. 147–157 (in Russian).
6. Izobov N. A. *Lyapunov exponents and stability*. Minsk, 2006. 319 p. (in Russian).
7. Lipnickij A. V. Estimation of Millionshchikov linear systems solutions deviation from the corresponding trygonemrtic sums. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2016, vol. 60, no. 3, pp. 5–10 (in Russian).
8. Kolmogorov A. N., Fomin S. V. *Elements of the theory of functions and of functional analysis*. Moscow, 2004. 572 p. (in Russian).

Информация об авторе

Липницкий Андрей Валерьевич – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник. Институт математики НАН Беларуси (ул. Сурганова, 11, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ya.andrei173@yandex.by.

Information about the author

Lipnitskii Andrei Valer'evich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Researcher. Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus (11, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ya.andrei173@yandex.by.

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

ФИЗИКА
PHYSICS

УДК 530.12,524.6,531
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-278-281>

Поступило в редакцию 22.06.2018
Received 22.06.2018

Ю. А. Курочкин

*Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск,
Республика Беларусь*

**КОГЕРЕНТНЫЕ СОСТОЯНИЯ, СВЯЗАННЫЕ
С ДВУМЕРНЫМИ ЭЛЛИПТИЧЕСКИМ И ГИПЕРБОЛИЧЕСКИМ УРАВНЕНИЯМИ**

(Представлено членом-корреспондентом Л. М. Томильчиком)

Аннотация. Показано, что совершая преобразования типа Леви–Чивита в двумерных уравнениях Гельмгольца и Клейна–Фока возможно определение когерентных состояний стандартным образом. При этом, если в случае эллиптического уравнения Гельмгольца преобразование Леви–Чивита реализуется комплексным квадратичным отображением, то в случае гиперболического уравнения типа Клейна–Фока оно реализуется аналогом такого отображения, определенного для функций двойного переменного. Найденны координатные и импульсные представления построенных когерентных состояний. Целью построения когерентных состояний описанным образом является дальнейшее развитие модели адронов, предложенной в [1; 2].

Ключевые слова: двумерное уравнение Гельмгольца, уравнение типа Клейна–Фока, преобразование Леви–Чивита, операторы рождения (уничтожения), когерентные состояния, поперечные возбуждения, партоны, координатное (импульсное) представление

Для цитирования: Курочкин, Ю. А. Когерентные состояния, связанные с двумерными эллиптическим и гиперболическим уравнениями / Ю. А. Курочкин // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 278–281. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-278-281>

Yurii A. Kurochkin

B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**COHERENT STATES ASSOCIATED WITH TWO-DIMENSIONAL ELLIPTIC
AND HIPERBOLIC EQUATIONS**

(Communicated by Corresponding Member Lev M. Tomilchik)

Abstract. In this article it is shown that by performing Levi–Chivita-type transformations in the two-dimensional Helmholtz and Klein–Fock-type equations, it is possible to determine coherent states in a standard way. Moreover, if in the case of the Helmholtz elliptic equation the Levi–Civita transformation is realized by a complex quadratic map, then in the case of the Klein–Fock-type equation it is realized by an analogue of such a map however defined for functions of a double variable. The coordinate and momentum representations of the coherent state are found. The purpose of constructing coherent states in the described manner is a further development of the hadron model proposed in [1; 2].

Keywords: scalar particle, Helmholtz equation, Klein–Fock type equation, Levi–Civita transformations, creation (annihilation) operators, coherent states, partons, coordinate (momentum) representation

For citation: Kurochkin Yu. A. The coherent states which connection with two dimensional elliptic and hyperbolic equation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 278–281 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-278-281>

Введение. Как известно, существуют проблемы с введением обычных (не обобщенных [3]) когерентных состояний в релятивистском случае [4]. Покажем ниже, что применение квадратичных конформных преобразований в комплексной области и их аналога для функций двойного

переменного (в литературе такие преобразования часто называют преобразованиями Леви–Чивита [5]), к двумерному уравнению Гельмгольца и двумерному уравнению типа Клейна–Фока–Гордона соответственно дает возможность в случае последнего уравнения, которое инвариантно относительно двумерных преобразований Лоренца также ввести когерентные состояния.

Будем рассматривать двумерное уравнение Гельмгольца (стационарное двумерное уравнение Шредингера)

$$\frac{\partial^2 \psi(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi(x, y)}{\partial y^2} = \Lambda_{\perp}^2 \psi(x, y) \quad (1)$$

и двумерное уравнение типа Клейна–Фока–Гордона

$$\frac{\partial^2 \varphi(z, t)}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \varphi(z, t)}{\partial t^2} = \Lambda_{\parallel}^2 \varphi(z, t). \quad (2)$$

Осуществим следующие замены переменных в (1): $\psi(x, y) \rightarrow \Phi_1(\eta, \xi)$ и проведем комплексификацию $x + iy = (\eta + i\xi)^2 = \eta^2 - \xi^2 + 2i\eta\xi$, тогда это уравнение примет вид

$$\frac{\partial^2 \Phi_1(\eta, \xi)}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \Phi_1(\eta, \xi)}{\partial \xi^2} = 4\Lambda_{\perp}^2 (\eta^2 + \xi^2) \Phi_1(\eta, \xi). \quad (3)$$

В уравнении (2) сделаем замены $(jz + t) = (\chi + j\zeta)^2 = j(\chi^2 + \zeta^2) + 2\chi\zeta$ и $\varphi(z, t) \rightarrow \Phi_2(\chi, \zeta)$. Здесь нами использовались аналитические функции, определенные над двойными числами для которых $j^2 = 1$. При этом вместо (3) получим

$$\frac{\partial^2 \Phi_2(\chi, \zeta)}{\partial \chi^2} - \frac{\partial^2 \Phi_2(\chi, \zeta)}{\partial \zeta^2} = 4\Lambda_{\parallel}^2 (\chi^2 - \zeta^2) \Phi_2(\chi, \zeta). \quad (4)$$

Отметим, что функции, заданные над двойными числами, являются адекватным аппаратом для описания релятивистских систем [6; 7] (см. также [8]).

Определение когерентных состояний. Теперь обратимся к (3), учитывая, что именно для таких состояний возможно введение когерентных состояний. Данное уравнение является уравнением осциллятора типа. Сформулируем его в терминах когерентных состояний. Для этого перепишем как

$$L_1 \Phi_1(\eta', \xi') = \frac{\partial^2 \Phi_1(\eta', \xi')}{\partial \eta'^2} + \frac{\partial^2 \Phi_1(\eta', \xi')}{\partial \xi'^2} - (\eta'^2 + \xi'^2) \Phi_1(\eta', \xi') = 0, \quad (5)$$

где $\eta' = 2\sqrt{\Lambda_{\perp}} \eta$, $\xi' = 2\sqrt{\Lambda_{\perp}} \xi$ и введем операторы рождения и уничтожения

$$a_1^{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\xi' \mp \frac{\partial}{\partial \xi'} \right), a_2^{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\eta' \mp \frac{\partial}{\partial \eta'} \right). \quad (6)$$

При этом оператор уравнения (5) может быть выражен через операторы (6) как

$$L_1 = -2(a_1^+ a_1^- + a_2^+ a_2^- + 1).$$

В (4) введем новые переменные $\chi' = 2\sqrt{\Lambda_{\parallel}} \chi$, $\zeta' = 2\sqrt{\Lambda_{\parallel}} \zeta$. Тогда оно примет вид

$$L_2 \Phi_2(\chi', \zeta') = \frac{\partial^2 \Phi_2(\chi', \zeta')}{\partial \chi'^2} - \frac{\partial^2 \Phi_2(\chi', \zeta')}{\partial \zeta'^2} - (\chi'^2 - \zeta'^2) \Phi_2(\chi', \zeta') = 0. \quad (7)$$

Введем операторы рождения и уничтожения, связанные с (7),

$$b_1^{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\chi' \mp \frac{\partial}{\partial \chi'} \right), b_2^{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\zeta' \mp \frac{\partial}{\partial \zeta'} \right). \quad (8)$$

Оператор L_2 выражается через операторы (8) следующим образом:

$$L_2 = -2(b_1^+ b_1^- - b_2^+ b_2^-). \quad (9)$$

Для каждой пары операторов рождения и уничтожения (6), (8) справедливы соотношения

$$[a_k^-, a_l^+] = \delta_{kl} I, [a_k^+, a_l^+] = [a_k^-, a_l^-] = [a_k^-, I] = [a_k^+, I] = 0,$$

где $k, l = 1, 2$ соответствуют η' или ξ'

$$[b_k^-, b_l^+] = \delta_{kl} I, [b_k^+, b_l^+] = [b_k^-, b_l^-] = [b_k^-, I] = [b_k^+, I] = 0, \quad (10)$$

определяющие алгебру Гейзенберга–Вейля.

Когерентные состояния, как известно, определяются как собственные состояния операторов уничтожения с комплексными собственными значениями [3]

$$a_1^- |\alpha_1\rangle = \alpha_1 |\alpha_1\rangle, a_2^- |\alpha_2\rangle = \alpha_2 |\alpha_2\rangle. \quad (11)$$

Соответственно для b_k^\mp

$$b_1^- |\beta_1\rangle = \beta_1 |\beta_1\rangle, b_2^- |\beta_2\rangle = \beta_2 |\beta_2\rangle. \quad (12)$$

Диагональный матричный элемент от оператора (9) в обкладках когерентных состояний (12) дает

$$-2(n_1 + n_2 + 2) = 0, \quad (13)$$

т. е. ведет к противоречию, выражение (13) нереализуемо. Данное обстоятельство объяснимо, так как собственные значения одномерного, а следовательно в данном случае и двумерного осциллятора не могут равняться нулю [9].

Для выражений (10), (12) соответствующий матричный элемент равен

$$-2(n_3 - n_4) = 0. \quad (14)$$

Выражение (14) не противоречиво, так как n_3 в принципе может равняться n_4 .

Координатные и импульсные представления когерентных состояний в новых переменных.

Решение уравнения (11), (12) в координатном ($\eta', \xi', \chi', \zeta'$) представлении дается выражением:

$$\langle \eta', \xi' | \alpha_1, \alpha_2 \rangle = \Phi(\eta', \xi') = \frac{1}{\pi} e^{i(\alpha_1' \alpha_1 + \alpha_2' \alpha_2)} \times e^{i\sqrt{2}(\alpha_1' \eta' + \alpha_2' \xi')} \times e^{-\frac{1}{2}[(\eta' - \sqrt{2}\alpha_1')^2 + (\xi' - \sqrt{2}\alpha_2')^2]} \quad (15)$$

$$\langle \chi', \zeta' | \beta_1, \beta_2 \rangle = \Phi(\chi', \zeta') = \frac{1}{\pi} e^{i(\beta_1' \beta_1 + \beta_2' \beta_2)} \times e^{i\sqrt{2}(\beta_1' \chi' + \beta_2' \zeta')} \times e^{-\frac{1}{2}[(\chi' - \sqrt{2}\beta_1')^2 + (\zeta' - \sqrt{2}\beta_2')^2]}. \quad (16)$$

Здесь $\alpha_1 = \alpha_1' + i\alpha_1''$, $\alpha_2 = \alpha_2' + i\alpha_2''$, $\beta_1 = \beta_1' + i\beta_1''$, $\beta_2 = \beta_2' + i\beta_2''$.

Импульсное представление в смысле операторов $i\partial / \partial \eta'$, $i\partial / \partial \xi'$, $i\partial / \partial \chi'$, $i\partial / \partial \zeta'$ с собственными значениями $p_{\eta'}$, $p_{\xi'}$, $p_{\chi'}$, $p_{\zeta'}$ имеет вид

$$\langle p_{\eta'}, p_{\xi'} | \alpha_1, \alpha_2 \rangle = \Phi(p_{\eta'}, p_{\xi'}) = \frac{1}{\pi} e^{-i(\alpha_1' p_{\eta'} + \alpha_2' p_{\xi'})} \times e^{-i\sqrt{2}(\alpha_1' p_{\eta'} + \alpha_2' p_{\xi'})} \times e^{-\frac{1}{2}[(p_{\eta'} - \sqrt{2}\alpha_1')^2 + (p_{\xi'} - \sqrt{2}\alpha_2')^2]} \quad (17)$$

$$\langle p_{\chi'}, p_{\zeta'} | \beta_1, \beta_2 \rangle = \Phi(p_{\chi'}, p_{\zeta'}) = \frac{1}{\pi} e^{-i(\beta_1' p_{\chi'} + \beta_2' p_{\zeta'})} \times e^{-i\sqrt{2}(\beta_1' p_{\chi'} + \beta_2' p_{\zeta'})} \times e^{-\frac{1}{2}[(p_{\chi'} - \sqrt{2}\beta_1')^2 + (p_{\zeta'} - \sqrt{2}\beta_2')^2]}.$$

Отметим также, что выражения (15)–(17) при обращающихся в ноль собственных значениях $\alpha_1 = \alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 0$, представляют собой решения, соответствующие вакуумным состояниям в представлении чисел заполнения и являются решениями уравнений (5) и (7) соответственно.

Заключение. Показано, что совершая преобразования типа Леви–Чивита в двумерных уравнениях Гельмгольца и уравнении типа Клейна–Фока возможно определение когерентных состояний стандартным образом. При этом, если в случае эллиптического уравнения Гельмгольца преобразование Леви–Чивита реализуется комплексным квадратичным отображением, то в случае гиперболического уравнения Клейна–Фока оно реализуется аналогом такого отображения, определенного для функций двойного переменного. Найдены координатные и импульсные представления построенных когерентных состояний.

В модели адрона, предложенной в [1], партонны – составляющие адрона рассматривались как когерентные возбуждения на орисфере релятивистского импульсного пространства. Модель носила феноменологический характер и не была подчинена каким-либо уравнениям. Целью построения когерентных состояний описанным выше образом является дальнейшее развитие предложенной модели адронов и установление возможных ограничений, следующих из уравнений теории поля.

Благодарности. Автор благодарит участников семинара лаборатории теоретической физики за полезное обсуждение работы и Л. М. Томильчика за полезные замечания. Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ № Ф16Д-003.

Acknowledgements. The author is grateful to the participants of the seminar of the Laboratory of Theoretical Physics for useful discussion of the work and to L. M. Tomilchik for valuable comments. The work was sponsored by the Grant of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research no. Ф16Д-003.

Список использованных источников

1. Hadron Coherent State on the Horosphere of the Lobachevsky Momentum Space / Y. Kurochkin [et al.] // Письма в журн. «Физика элементарных частиц и атомного ядра». – 2016. – Т. 13, № 3. – С. 454–460.
2. Кварк во внешнем неабелевом калибровочном поле магнитного типа: когерентные состояния / Ю. А. Курочкин [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2017. – № 4. – С. 39–43.
3. Переломов, А. М. Обобщенные когерентные состояния и их применения / А. М. Переломов. – М., 1987. – 268 с.
4. Точные решения релятивистских волновых уравнений / В. Г. Богров [и др.] // Точные решения релятивистских волновых уравнений. – Новосибирск, 1982. – 143 с.
5. Kalnins, E. G. Coulomb-Oscillator duality in space of constant curvature / E. G. Kalnins, W. Miller, Jr., G. S. Pogosyan // J. Math. Phys. – 2000. – Vol. 41, N 5. – P. 2629–2657. <https://doi.org/10.1063/1.533263>
6. Курочкин, Ю. А. Двойные числа в задаче о движении электрического заряда во внешних полях / Ю. А. Курочкин // Ковариантные методы в теоретической физике. Физика элементарных частиц и теория относительности. – Минск, 1991. – С. 98–101.
7. Богуш, А. А. Классическая теория векторного поля на псевдоевклидовой плоскости в терминах аналитических функций двойного переменного и ее связь с теорией релятивистских струн / А. А. Богуш, В. В. Грицев, Ю. А. Курочкин // Ковариантные методы в теоретической физике. Физика элементарных частиц и теория относительности. – Минск, 1997. – С. 45–49.
8. Акивис, М. А. О гладких линиях на проективных плоскостях над некоторыми ассоциативными алгебрами / М. А. Акивис // Матем. заметки. – 1987. – Т. 41, вып. 2. – С. 227–237.
9. Ландау, Л. Д. Квантовая механика. Нерелятивистская теория / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М., 1989. – 767 с.

References

1. Kurochkin Y., Kulchitsky Y., Harkusha S., Russakovich N. Hadron as coherent state on the horosphere of the Lobachevsky momentum space. *Physics of the Particles and Nuclei Letters*, 2016, vol. 13, no. 3, pp. 285–288. <https://doi.org/10.1134/s1547477116030158>
2. Kurochkin Yu. A., Harkusha S. N., Kulchitsky Yu. A., Russakovich N. A. Quark in the external gluon field of magnetic type: coherent states. *Vestsi Natsyional'най akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2017, no. 4, pp. 39–43.
3. Perelomov A. M. *Generalized coherent states and their applications*. Moscow, 1987. 268 p. (in Russian).
4. Bogrov V. G., Gitman D. M., Ternov I. M., Khalilov V. R., Shapovalov V. N. *Exact solutions of the relativistic wave equations*. Novosibirsk, 1982. 143 p. (in Russian).
5. Kalnins E. G., Miller W., Jr., Pogosyan G. S. Coulomb-Oscillator duality in space of constant curvature. *Journal of Mathematical Physics*, 2000, vol. 41, no. 5, pp. 2629–2657. <https://doi.org/10.1063/1.533263>
6. Kurochkin Yu. A. Double numbers in the problem on the motion of an electric charge in external fields. *Kovariantnye metody v teoreticheskoi fizike. Fizika elementarnykh chastits i teoriya otноситel'nosti [Covariant methods in theoretical physics. Elementary particle physics and relativity theory]*. Minsk, 1991, pp. 98–101 (in Russian).
7. Bogush A. A., Gritsev V. V., Kurochkin Yu. A. Classical theory of vector field on a pseudo-Euclidean plane in terms of the analytical functions of a double variable and its relationship with theory of relativistic string. *Kovariantnye metody v teoreticheskoi fizike. Fizika elementarnykh chastits i teoriya otноситel'nosti [Covariant methods in theoretical physics. Elementary particle physics and relativity theory]*. Minsk, 1997, pp. 45–49 (in Russian).
8. Akivis M. A. Smooth lines on projective planes over certain associative algebras. *Mathematical Notes of the Academy of Sciences of the USSR*, 1987, vol. 41, no. 2, pp. 131–136. <https://doi.org/10.1007/bf01138334>
9. Landau L. D., Lifshits E. M. *Quantum mechanics. Non-relativistic theory*. Moscow, 1989. 767 p. (in Russian).

Информация об авторе

Курочкин Юрий Андреевич – д-р физ.-мат. наук, заведующий центром. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yukuroch@dragon.bas-net.by.

Information about the author

Kurochkin Yurii Andreevich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Center. 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: yukuroch@dragon.bas-net.by.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

UDC 539.12

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-282-290>

Received 22.04.2019

Поступило в редакцию 22.04.2019

Alina V. Ivashkevich¹, Elena M. Ovsyuk¹, Vasily V. Kisel², Viktor M. Red'kov³¹*Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin, Mozyr, Republic of Belarus*²*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*³*B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***SPHERICAL SOLUTIONS OF THE WAVE EQUATION FOR A SPIN 3/2 PARTICLE***(Communicated by Corresponding Member Lev M. Tomilchik)*

Abstract. The wave equation for a spin 3/2 particle, described by 16-component vector-bispinor, is investigated in spherical coordinates. In the frame of the Pauli–Fierz approach, the complete equation is split into the main equation and two additional constraints, algebraic and differential. The solutions are constructed, on which 4 operators are diagonalized: energy, square and third projection of the total angular momentum, and spatial reflection, these correspond to quantum numbers $\{\varepsilon, j, m, P\}$. After separating the variables, we have derived the radial system of 8 first-order equations and 4 additional constraints. Solutions of the radial equations are constructed as linear combinations of the Bessel functions. With the use of the known properties of the Bessel functions, the system of differential equations is transformed to the form of purely algebraic equations with respect to three quantities a_1, a_2, a_3 . Its solutions may be chosen in various ways by solving the simple linear equation $A_1 a_1 + A_2 a_2 + A_3 a_3 = 0$, where the coefficients A_i are expressed through the quantum numbers ε, j . Two most simple and symmetric solutions have been chosen. Thus, at fixed quantum numbers $\{\varepsilon, j, m, P\}$ there exists double-degeneration of the quantum states.

Keywords: spin 3/2 particle, degrees of freedom, spherical symmetry, exact solutions, Bessel functions, degeneration of quantum states

For citation: Ivashkevich A. V., Ovsyuk E. M., Kisel V. V., Red'kov V. M. Spherical solutions of the wave equation for a spin 3/2 particle. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 282–290 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-282-290>

А. В. Ивашкевич¹, Е. М. Овсюк¹, В. В. Кисель², В. М. Редьков³¹*Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина, Мозырь, Республика Беларусь*²*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь*³*Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***СФЕРИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ЧАСТИЦЫ СО СПИНОМ 3/2***(Представлено членом-корреспондентом Л. М. Томильчиком)*

Аннотация. Волновое уравнение для частицы со спином 3/2, описываемой 16-компонентным вектор-биспинором, исследовано в сферической системе координат. В рамках подхода Паули–Фирца уравнение разбивается на основное и два дополнительных, алгебраическое и дифференциальное. Строятся решения, на которых диагонализуются четыре оператора: энергии, квадрата и третьей проекции полного момента, пространственного отражения, им соответствуют квантовые числа $\{\varepsilon, j, m, P\}$. После проведения разделения переменных выведена основная система из 8 зацепляющихся радиальных дифференциальных уравнений 1-го порядка и 4 условия связи: 2 алгебраических и 2 дифференциальных. Основная система приводится к виду 4 отдельных уравнений 2-го порядка, решения которых строятся в функциях Бесселя. С использованием свойств функций Бесселя вся система радиальных уравнений для частицы со спином 3/2 приведена к одному алгебраическому линейному уравнению $A_1 a_1 + A_2 a_2 + A_3 a_3 = 0$ относительно величин a_1, a_2, a_3 , в котором коэффициенты A_i выражаются через квантовые числа ε, j . Выбраны наиболее симметричные решения, которые определяют два решения при фиксированных квантовых числах $\{\varepsilon, j, m, P\}$.

Ключевые слова: частица со спином 3/2, степени свободы, сферическая симметрия, точные решения, функции Бесселя, вырождение квантовых состояний

Для цитирования. Сферические решения уравнения для частицы со спином 3/2 / А. В. Ивашкевич [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 282–290. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-282-290>

The basic wave equation and spherical symmetry. The theory of spin 3/2 particle is attracted steady interest after the seminal investigation by Pauli and Fierz – see [1–15]. Let us recall the most significant aspect of spin 3/2 particle theory. First of all, it is the problem of choosing an initial system of equations. The most consistent is an approach based on Lagrangian formalism and a correct first order equation for multi-component wave function which are based on the general theory of 1st order relativistic wave equations. However investigations are based on the use of 2nd order equations. Such a choice is of prime importance when we take into account the presence of external electromagnetic (or gravitational) fields. Applying the first order approach ensures correct solving the problem of independent degrees of freedom in presence of external fields; for instance see in [16]. The great attention was given to existence in this theory of solutions which correspond to a particle moving with velocity greater than the light velocity. Finally a separate interest has a massless case for spin 3/2 field, when – as shown by Pauli and Fierz – there exists specific gauge symmetry: the 4-gradient of arbitrary bispinor function provides us with solution for the massless field equation, for instance, see in [16].

In the present paper we examine the problem of degree of freedom for a massive spin 3/2 particle specified for solutions with spherical symmetry. For simplicity we restrict ourselves to Minkowski space-time model. The wave equation for such a particle in absence of external fields may be presented as a set of a main equation and two additional constraints (we assume the use of the tetrad formalism, see [16])

$$\begin{aligned} [i\gamma^\beta(x)(\nabla_\beta + \Gamma_\beta(x)) - m] \Psi_\alpha(x) &= 0, \\ \gamma^\alpha(x)\Psi_\alpha(x) &= 0, \quad (\nabla_\alpha + \Gamma_\alpha(x))\Psi^\alpha(x) = 0, \end{aligned} \tag{1}$$

the wave function $\Psi_\alpha(x)$ behaves as a bispinor with respect to tetrad transformations, and as a generally covariant vector with respect to coordinate transformations; we use the notations [16]:

$$m = \frac{Mc}{\hbar}, \quad \gamma^\beta(x) = e^\beta_{(a)}(x)\gamma^a, \quad \Gamma_\beta(x) = \frac{1}{2}(\sigma^{ab})_k{}^l e^\beta_{(a)}(\nabla_\alpha e_{(b)\beta}), \quad \sigma^{ab} = \frac{\gamma^a\gamma^b - \gamma^b\gamma^a}{4}.$$

Below, it will be convenient to use the wave function with tetrad-vector index, $\Psi_l(x)$, it relates to the previous function $\Psi_\alpha(x)$ in accordance with the rule

$$\Psi_l(x) = e^\beta_{(l)}(x)\Psi_\beta(x), \quad \Psi_\beta(x) = e^\beta_{(l)}(x)\Psi_l(x).$$

Correspondingly, the system of equations (1) takes the form (for shortness, in the main equation we omit vector indices in the wave function)

$$\begin{aligned} [i\gamma^\alpha(x)(\partial_\alpha + B_\alpha(x)) - m]\Psi(x) &= 0, \\ \gamma^l\Psi_l(x) &= 0, \quad [e^{(l)\alpha}\partial_\alpha + e^{(l)\alpha}(x) + e^{(l)\alpha}(x)\Gamma_\alpha(x)]\Psi_l(x) = 0, \end{aligned} \tag{2}$$

where

$$\begin{aligned} (j^{ab})_k{}^l &= \delta_k^a g^{bl} - \delta_k^b g^{al}, \quad L_\alpha(x) = \frac{1}{2}(j^{ab})_k{}^l e^\beta_{(a)}(\nabla_\alpha e_{(b)\beta}), \\ J^{ab} &= \sigma^{ab} \otimes I + I \otimes j^{ab}, \quad B_\alpha(x) = \Gamma_\alpha(x) \otimes I + I \otimes L_\alpha(x). \end{aligned}$$

We will specify equations (2) in spherical coordinates

$$x^\alpha = (t, r, \theta, \phi), \quad dS^2 = dt^2 - dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2),$$

the main equation takes the form

$$\left\{ i\gamma^0\partial_0 + i\gamma^3\partial_r + \frac{\gamma^1 \otimes T^2 - \gamma^2 \otimes T^1}{r} + \frac{1}{r}\Sigma_{\theta,\phi} - m \right\} \Psi(t, r, \theta, \phi) = 0,$$

where the angular operator $\Sigma_{\theta,\phi}$ is determined by the formula

$$\Sigma_{\theta,\phi} = i\gamma^1\partial_\theta + \gamma^2 \frac{i\partial_\phi + (i\sigma^{12} \otimes I + I \otimes ij^{12})\cos\theta}{\sin\theta}.$$

Searching solutions in the form of spherical waves, we are to diagonalize operators of the square and third projection of the total angular momentum. In Cartesian basis, the components of the total angular momentum are defined as follows

$$J_i^{Cart} = l_i + S_i, \quad S_1 = iJ^{23}, \quad S_2 = iJ^{31}, \quad S_3 = iJ^{12},$$

$$S_i = \frac{1}{2} \Sigma_i \otimes I + I \otimes T_i, \quad T_i = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \tau_i \end{vmatrix},$$

where symbol \otimes stands for a direct product of the matrices. Operators J_i in spherical tetrad basis are given by the formulas [17]

$$J_1 = l_1 + S_3 \frac{\sin \phi}{\sin \theta}, \quad J_2 = l_2 + S_3 \frac{\cos \phi}{\sin \theta}, \quad J_3 = l_3 = -i \frac{\partial}{\partial \phi}.$$

The components of the wave function may be listed with the help of bispinor index A and 4-vector index (l):

$$\Psi_{A(l)} = \begin{vmatrix} \Psi_{1(0)} & \Psi_{1(1)} & \Psi_{1(2)} & \Psi_{1(3)} \\ \Psi_{2(0)} & \Psi_{2(1)} & \Psi_{2(2)} & \Psi_{2(3)} \\ \Psi_{3(0)} & \Psi_{3(1)} & \Psi_{3(2)} & \Psi_{3(3)} \\ \Psi_{4(0)} & \Psi_{4(1)} & \Psi_{4(2)} & \Psi_{4(3)} \end{vmatrix}.$$

It is convenient to use so called cyclic basis in which the generator ij^{12} becomes diagonal. The needed transformation $\tilde{\Psi} = U\Psi$ is given by the formulas

$$\begin{vmatrix} \tilde{\Psi}_{(0)} \\ \tilde{\Psi}_{(1)} \\ \tilde{\Psi}_{(2)} \\ \tilde{\Psi}_{(3)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/\sqrt{2} & i/\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & +1/\sqrt{2} & i/\sqrt{2} & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Psi_{(0)} \\ \Psi_{(1)} \\ \Psi_{(2)} \\ \Psi_{(3)} \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} \tilde{\Psi}_{(0)} \\ \tilde{\Psi}_{(1)} \\ \tilde{\Psi}_{(2)} \\ \tilde{\Psi}_{(3)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/\sqrt{2} & 0 & 1/\sqrt{2} \\ 0 & -i/\sqrt{2} & 0 & -i/\sqrt{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Psi_{(0)} \\ \Psi_{(1)} \\ \Psi_{(2)} \\ \Psi_{(3)} \end{vmatrix}.$$

In cyclic basis we have the diagonal form for \tilde{S}_3 :

$$\tilde{S}_3 = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} +1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{vmatrix} \otimes I + I \otimes \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{vmatrix}.$$

In cyclic basis, the above equations (2) read

$$[i\gamma^\alpha(x)(\partial_\alpha + \Gamma_\alpha(x) \otimes I + I \otimes \tilde{L}_\alpha(x)) - m]\tilde{\Psi} = 0,$$

$$\gamma^l \Psi_l(x) = \gamma^l (U^{-1})_{lk} \tilde{\Psi}_k(x) = 0,$$

$$[e^{(l)\alpha}(x)\partial_\alpha + e^{(l)\alpha}(x) + e^{(l)\alpha}(x)\Gamma_\alpha(x)](U^{-1})_{lk} \Psi_k(x) = 0.$$

In cyclic basis the main equation takes the form (let $\tilde{\Psi} = \frac{1}{r}\tilde{\Phi}$)

$$\left[\gamma^0 \varepsilon + i\gamma^3 \partial_r + \frac{\gamma^1 \otimes \tilde{T}_2 - \gamma^2 \otimes \tilde{T}_1}{r} + \frac{1}{r} \tilde{\Sigma}_{\theta,\phi} - m \right] \tilde{\Phi}(r, \theta, \phi) = 0,$$

$$\tilde{\Sigma}_{\theta,\phi} = i\gamma^1 \partial_\theta + \gamma^2 \frac{i\partial_\phi + i\tilde{S}_3 \cos \theta}{\sin \theta}.$$

Separating the variables. The general substitution for spherical solutions with quantum numbers j, m has the structure (for more details see [17])

$$\tilde{\xi}_l = \begin{vmatrix} f_0 \delta_i^0 D_{-1/2} + f_1 \delta_i^1 D_{-3/2} + f_2 \delta_i^2 D_{-1/2} + f_3 \delta_i^3 D_{+1/2} \\ g_0 \delta_i^0 D_{+1/2} + g_1 \delta_i^1 D_{-1/2} + g_2 \delta_i^2 D_{+1/2} + g_3 \delta_i^3 D_{+3/2} \end{vmatrix},$$

we take into account that vector-bispinor consists of two vector-spinors, $\tilde{\xi}_l, \tilde{\eta}_l$, the second vector-spinor $\tilde{\eta}_l$ has the similar structure but with other radial functions

$$f_i(r) \Rightarrow h_i(r), \quad g_i(r) \Rightarrow v_i(r).$$

Symbol D_σ stands for Wigner D -functions: $D_\sigma = D_{m,\sigma}^j(\phi, \theta, 0)$, $\sigma = -3/2, -1/2, +1/2, +3/2$. Diagonalization of the spatial reflection operator leads to additional restrictions

$$v_0 = \delta f_0, \quad v_1 = \delta f_3, \quad v_2 = \delta f_2, \quad v_3 = \delta f_1,$$

$$h_0 = \delta g_0, \quad h_1 = \delta g_3, \quad h_2 = \delta g_2, \quad h_3 = \delta g_1,$$

where $\delta = +1$ corresponds to the parity $P = (-1)^{j+1}$ and $\delta = -1$ corresponds to $P = (-1)^j$.

After rather laborious calculation on separating the variables, we arrive at 8 first-order equations for states with parity $(-1)^{j+1}$:

$$\begin{aligned} \left(\varepsilon - i \frac{d}{dr}\right) g_0 &= \left(m + i \frac{a}{r}\right) f_0, & \left(\varepsilon + i \frac{d}{dr}\right) f_0 &= \left(m - i \frac{a}{r}\right) g_0, \\ \left(\varepsilon - i \frac{d}{dr}\right) g_3 - i \frac{b}{r} f_3 &= m f_1, & \left(\varepsilon + i \frac{d}{dr}\right) f_1 + i \frac{b}{r} g_1 &= m g_3, \\ \left(\varepsilon + i \frac{d}{dr}\right) f_3 + i \frac{\sqrt{2}}{r} g_2 + i \frac{b}{r} g_3 &= m g_1, & \left(\varepsilon - i \frac{d}{dr}\right) g_1 - i \frac{\sqrt{2}}{r} f_2 - i \frac{b}{r} f_1 &= m f_3, \\ \left(\varepsilon - i \frac{d}{dr}\right) g_2 &= +i \frac{\sqrt{2}}{r} f_3 + \left(m + i \frac{a}{r}\right) f_2, & \left(\varepsilon + i \frac{d}{dr}\right) f_2 &= -i \frac{\sqrt{2}}{r} g_1 + \left(m - i \frac{a}{r}\right) g_2; \end{aligned} \quad (3)$$

where $a = j + 1/2, b = \sqrt{(j - 1/2)(j + 3/2)}, j = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$; to obtain similar equations for states with parity $(-1)^j$ it suffices to make formal change m to $-m$.

The above additional constraints lead to equations (they are the same for both values of parity)

$$\begin{aligned} g_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(f_2 + f_0), & f_3 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(g_2 - g_0); \\ -i\varepsilon f_0 - \left(\frac{d}{dr} + \frac{1}{r}\right) f_2 &= \frac{1}{\sqrt{2}r}(g_1 + b f_1 + a f_3), \\ -i\varepsilon g_0 - \left(\frac{d}{dr} + \frac{1}{r}\right) g_2 &= \frac{1}{\sqrt{2}r}(f_3 + b g_3 + a g_1). \end{aligned}$$

Equations for functions f_0, g_0 . First we are to solve equations for functions f_0, g_0 (see two first equations in (3)). Summing and subtracting these two equations

$$\left(i\varepsilon + \frac{d}{dr}\right) g_0 = \left(im - \frac{a}{r}\right) f_0, \quad \left(i\varepsilon - \frac{d}{dr}\right) f_0 = \left(im + \frac{a}{r}\right) g_0, \quad (4)$$

we produce

$$\left(\frac{d}{dr} + \frac{a}{r}\right) F_0 = i(\varepsilon + m)G_0, \quad \left(\frac{d}{dr} - \frac{a}{r}\right) G_0 = i(\varepsilon - m)F_0,$$

where the notations $F_0 = f_0 + g_0, G_0 = f_0 - g_0$ are used. From (4), we derive two 2nd order equations

$$\begin{aligned} \left(\frac{d^2}{dr^2} - \frac{a^2 + a}{r^2} + \varepsilon^2 - m^2 \right) F_0 &= 0, \quad l = a; \\ \left(\frac{d^2}{dr^2} - \frac{(a-1)a}{r^2} + \varepsilon^2 - m^2 \right) G_0 &= 0, \quad l' = a - 1. \end{aligned} \quad (5)$$

In the variable $x = \sqrt{\varepsilon^2 - m^2} r$ they read

$$\left(\frac{d^2}{dx^2} + 1 - \frac{l(l+1)}{x^2} \right) F_0(x) = 0, \quad \left(\frac{d^2}{dx^2} + 1 - \frac{l'(l'+1)}{x^2} \right) G_0(x) = 0.$$

Let it be

$$F_0(x) = a_0 \sqrt{x} Z_l(x), \quad G_0(x) = b_0 \sqrt{x} Z_{l'}(x),$$

then eqs. (5) give

$$\begin{aligned} Z_l + \frac{1}{x} Z_{l+1} - \frac{(l+1/2)^2}{x^2} Z_l &= 0, \quad l+1/2 = j+1 = p, \\ Z_{l'} + \frac{1}{x} Z_{l'+1} - \frac{(l'-1/2)^2}{x^2} Z_{l'} &= 0, \quad l'+1/2 = j = p-1. \end{aligned}$$

They have the Bessel's form

$$Z'' + \frac{1}{x} Z' + \left(1 - \frac{p^2}{x^2} \right) Z = 0.$$

Thus, functions F_0 and G_0 relate to Bessel functions.

The first-order equations (4) for functions F_0, G_0 , after transforming them to the variable x will take the form

$$\left(\frac{d}{dx} + \frac{p}{x} \right) Z_p = \sqrt{\frac{\varepsilon+m}{\varepsilon-m}} \left(i \frac{b_0}{a_0} \right) Z_{p-1}, \quad \left(\frac{d}{dx} - \frac{p-1}{x} \right) Z_{p-1} = \sqrt{\frac{\varepsilon-m}{\varepsilon+m}} \left(i \frac{a_0}{b_0} \right) Z_p. \quad (6)$$

Due to the known equations

$$\left(\frac{d}{dx} + \frac{p}{z} \right) Z_p = Z_{p-1}, \quad \left(\frac{d}{dx} - \frac{p}{z} \right) Z_p = -Z_{p+1} = 0,$$

from (6) we find a relative coefficient between the quantities a_0 and b_0 :

$$\sqrt{\varepsilon+m} b_0 = -i \sqrt{\varepsilon-m} a_0.$$

Equations for functions f_i and g_i . Now, we turn to 6 equations from (3)

$$\begin{aligned} \left(\varepsilon + i \frac{d}{dr} \right) f_1 + i \frac{b}{r} g_1 &= m g_3, \quad \left(\varepsilon - i \frac{d}{dr} \right) g_3 - i \frac{b}{r} f_3 = m f_1, \\ \left(\varepsilon + i \frac{d}{dr} \right) f_2 + i \frac{\sqrt{2}}{r} g_1 &= \left(m - i \frac{a}{r} \right) g_2, \quad \left(\varepsilon - i \frac{d}{dr} \right) g_2 - i \frac{\sqrt{2}}{r} f_3 = \left(m + i \frac{a}{r} \right) f_2, \\ \left(\varepsilon + i \frac{d}{dr} \right) f_3 + i \frac{\sqrt{2}}{r} g_2 + i \frac{b}{r} g_3 &= m g_1, \quad \left(\varepsilon - i \frac{d}{dr} \right) g_1 - i \frac{\sqrt{2}}{r} f_2 - i \frac{b}{r} f_1 = m f_3. \end{aligned} \quad (7)$$

It is convenient to employ the following variables

$$f_1 + g_3 = F_1, \quad f_1 - g_3 = G_1, \quad f_2 + g_2 = F_2, \quad f_2 - g_2 = G_2, \quad f_3 + g_1 = F_3, \quad f_3 - g_1 = G_3.$$

Summing and subtracting equations (7) within each pair, we produce

$$\begin{aligned} \frac{d}{dr}G_1 + i(m - \varepsilon)F_1 &= +\frac{b}{r}G_3, & \frac{d}{dr}F_1 - i(m + \varepsilon)G_1 &= -\frac{b}{r}F_3; \\ \left(\frac{d}{dr} - \frac{a}{r}\right)G_2 + i(m - \varepsilon)F_2 &= +\frac{\sqrt{2}}{r}G_3, & \left(\frac{d}{dr} + \frac{a}{r}\right)F_2 - i(m + \varepsilon)G_2 &= -\frac{\sqrt{2}}{r}F_3; \\ \frac{d}{dr}G_3 - \frac{\sqrt{2}}{r}G_2 + i(m - \varepsilon)F_3 &= +\frac{b}{r}G_1, & \frac{d}{dr}F_3 + \frac{\sqrt{2}}{r}F_2 - i(m + \varepsilon)G_3 &= -\frac{b}{r}F_1. \end{aligned}$$

This system may be presented in a matrix form

$$\frac{d}{dr} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -b/r & i(m + \varepsilon) & 0 & 0 \\ 0 & -a/r & -\sqrt{2}/r & 0 & i(m + \varepsilon) & 0 \\ -b/r & -\sqrt{2}/r & 0 & 0 & 0 & i(m + \varepsilon) \\ -i(m - \varepsilon) & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{b}{r} \\ 0 & -i(m - \varepsilon) & 0 & 0 & a/r & \sqrt{2}/r \\ 0 & 0 & -i(m - \varepsilon) & b/r & \sqrt{2}/r & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{pmatrix},$$

or more shortly

$$\left(\frac{d}{dr} + \frac{A}{r}\right)F = i(m + \varepsilon)G, \quad \left(\frac{d}{dr} - \frac{A}{r}\right)G = -i(m - \varepsilon)F, \quad A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & b \\ 0 & a & \sqrt{2} \\ b & \sqrt{2} & 0 \end{pmatrix}.$$

Applying the exclusion method, we derive equations for $F = (F_1, F_2, F_3)$ and $G = (G_1, G_2, G_3)$

$$\Delta F = (A^2 + A)F, \quad \Delta G = (A^2 - A)G, \quad \Delta = r^2 \left(\frac{d^2}{dr^2} + \varepsilon^2 - m^2 \right).$$

We have found transformations S and S' which diagonalize two mixing matrices:

$$\begin{aligned} \bar{F} = SF, \quad \Delta \bar{F} = (STS^{-1})\bar{F}, \quad STS^{-1} &= \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix}; \\ \bar{G} = SG, \quad \Delta \bar{G} = (S'T'S'^{-1})\bar{G}, \quad S'T'S'^{-1} &= \begin{pmatrix} \lambda'_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda'_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda'_3 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

In this way, we get 8 separated equations (also we write down equations for F_0 and G_0)

$$\begin{aligned} \left(\frac{d^2}{dr^2} + \varepsilon^2 - m^2 - \frac{j'(j'+1)}{r^2}\right)F_0 &= 0, \quad j' = j + 1/2, \quad F_0 = a_0 f_{j+1/2}; \\ \left(\frac{d^2}{dr^2} + \varepsilon^2 - m^2 - \frac{j'(j'+1)}{r^2}\right)G_0 &= 0, \quad j' = j - 1/2, \quad G_0 = b_0 f_{j-1/2}; \\ \left(\frac{d^2}{dr^2} + \varepsilon^2 - m^2 - \frac{j'(j'+1)}{r^2}\right)\bar{F}_1 &= 0, \quad j' = j - 1/2, \quad \bar{F}_1 = a_1 f_{j-1/2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{d^2}{dr^2} + \varepsilon^2 - m^2 - \frac{j'(j'+1)}{r^2} \right) \bar{G}_1 &= 0, \quad j' = j+1/2, \quad \bar{G}_1 = b_1 f_{j+1/2}; \\ \left(\frac{d^2}{dr^2} + \varepsilon^2 - m^2 - \frac{j'(j'+1)}{r^2} \right) \bar{F}_2 &= 0, \quad j' = j+3/2, \quad \bar{F}_2 = a_2 f_{j+3/2}; \\ \left(\frac{d^2}{dr^2} + \varepsilon^2 - m^2 - \frac{j'(j'+1)}{r^2} \right) \bar{G}_2 &= 0, \quad j' = j-3/2, \quad \bar{G}_2 = b_2 f_{j-3/2}; \\ \left(\frac{d^2}{dr^2} + \varepsilon^2 - m^2 - \frac{j'(j'+1)}{r^2} \right) \bar{F}_3 &= 0, \quad j' = j-1/2, \quad \bar{F}_3 = a_3 f_{j-1/2}; \\ \left(\frac{d^2}{dr^2} + \varepsilon^2 - m^2 - \frac{j'(j'+1)}{r^2} \right) \bar{G}_3 &= 0, \quad j' = j+1/2, \quad \bar{G}_3 = b_3 f_{j+1/2}. \end{aligned}$$

They have similar mathematical structure, and all may be reduced to Bessel's type.

It should be emphasized that parameters a_1, a_2, a_3 and b_1, b_2, b_3 cannot be considered as independent, because there exists the first-order differential equation which relates F and G :

$$\left(\frac{d}{dr} + \frac{A}{r} \right) F = i(m + \varepsilon)G;$$

whence with the formulas $F = S^{-1}\bar{F}$ and $G = S'^{-1}\bar{G}$ in mind, we derive

$$\left(\frac{d}{dr} + \frac{SAS^{-1}}{r} \right) \bar{F} = i(m + \varepsilon)SS'^{-1}\bar{G}.$$

We have found the matrices SAS^{-1} and SS'^{-1} , this makes possible to obtain linear constraints

$$\begin{aligned} b_1 &= i \sqrt{\frac{\varepsilon - m}{\varepsilon + m}} \frac{1}{4(j+1)} \left\{ \sqrt{\frac{j+3/2}{j-1/2}} \left((2j+1)\sqrt{2}a_1 - 2a_3 \right) + \sqrt{2}a_2 \right\}, \\ b_3 &= i \sqrt{\frac{\varepsilon - m}{\varepsilon + m}} \frac{1}{4(j+1)} \left\{ \sqrt{\frac{j+3/2}{j-1/2}} \left((2j+1)a_1 - \sqrt{2}a_3 \right) - (2j+1)a_2 \right\}, \\ b_2 &= i \sqrt{\frac{\varepsilon - m}{\varepsilon + m}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} a_1 - a_3 \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Two independent solutions. With the use of the properties of Bessel functions, all differential equations have been transformed to algebraic form, so in total we have 4 independent algebraic constraints

$$\begin{aligned} \sqrt{2} a_1 - a_3 &= -\sqrt{j-1/2} \sqrt{2} b_0, \quad \sqrt{2} b_1 - b_3 = +\sqrt{j+3/2} a_0, \\ i \frac{\Gamma}{2\alpha} a_0 - (j+3/2)\sqrt{2} a_1 + \sqrt{(j+3/2)(j-1/2)} \sqrt{2} a_2 + (2j+1)a_3 &= 0, \\ i \frac{\Gamma}{\beta} b_0 + (j-1/2)\sqrt{2} b_1 - \sqrt{(j+3/2)(j-1/2)} \sqrt{2} b_2 - (2j+1)b_3 &= 0; \\ \sqrt{\varepsilon + m} b_0 &= -i\sqrt{\varepsilon - m} a_0, \quad \frac{1}{2\alpha} = 4(j+1)\sqrt{2j-1}, \quad \frac{1}{\beta} = -4j\sqrt{j+3/2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Two first relations in (9) permit us to exclude the parameters a_0 and b_0 :

$$a_0 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{j+3/2}} b_1 - \frac{1}{\sqrt{j+3/2}} b_3, \quad b_0 = -\frac{a_1}{\sqrt{j-1/2}} + \frac{1}{\sqrt{2}\sqrt{j-1/2}} a_3, \quad (10)$$

so from (9) we get

$$\begin{aligned}
 & i \frac{\Gamma}{2\alpha} \frac{1}{\sqrt{j+3/2}} (\sqrt{2}b_1 - b_3) - (j+3/2)\sqrt{2}a_1 + \sqrt{(j+3/2)(j-1/2)}\sqrt{2}a_2 + (2j+1)a_3 = 0, \\
 & i \frac{\Gamma}{\beta} \frac{1}{\sqrt{j-1/2}} \left(-a_1 + \frac{a_3}{\sqrt{2}} \right) + (j-1/2)\sqrt{2}b_1 - \sqrt{(j+3/2)(j-1/2)}\sqrt{2}b_2 - (2j+1)b_3 = 0. \quad (11)
 \end{aligned}$$

In turn, taking into account $\sqrt{\varepsilon - m}a_0 = i\sqrt{\varepsilon + m}b_0$ from (10) we derive

$$\frac{\sqrt{\varepsilon - m}}{\sqrt{j+3/2}} (\sqrt{2}b_1 - b_3) = \frac{i\sqrt{\varepsilon + m}}{\sqrt{j-1/2}} \left(-a_1 + \frac{a_3}{\sqrt{2}} \right).$$

This identity permits us to transform equations (11) to the form, when the first equation includes only a_i , and the second one contains only b_i :

$$\begin{aligned}
 & \frac{4\varepsilon(j+1)}{\varepsilon - m} \left(a_1 - \frac{a_3}{\sqrt{2}} \right) - \left(j + \frac{3}{2} \right) a_1 + (2j+1) \frac{a_3}{\sqrt{2}} + \sqrt{\left(j + \frac{3}{2} \right) \left(j - \frac{1}{2} \right)} a_2 = 0, \\
 & \frac{4\varepsilon j}{\varepsilon + m} \left(b_1 - \frac{b_3}{\sqrt{2}} \right) - \left(j - \frac{1}{2} \right) b_1 + (2j+1) \frac{b_3}{\sqrt{2}} + \sqrt{\left(j + \frac{3}{2} \right) \left(j - \frac{1}{2} \right)} b_2 = 0; \quad (12)
 \end{aligned}$$

note that a_0, b_0 may be found from (10). The general structure of two equations (12) is

$$A_1 a_1 + A_2 a_2 + A_3 a_3 = 0, \quad B_1 b_1 + B_2 b_2 + B_3 b_3 = 0.$$

We are to fix two independent solutions of the main linear constraint for coefficients a_i . In this way obtain two independent solutions of the equations for spin 3/2 particle, evidently there exist many possibilities for that choosing. By simplicity reason, let us take the following solutions:

$$\begin{aligned}
 (1), \quad & a_1^{(1)} = 0 \Rightarrow A_2 a_2^{(1)} + A_3 a_3^{(1)} = 0 \Rightarrow \\
 & a_3^{(1)} = -\frac{A_2}{A_3} a_2^{(1)} = -\frac{(\varepsilon - m)\sqrt{(j-1/2)(j+3/2)}}{4(j+1)\varepsilon + (2j+1)(\varepsilon - m)} \sqrt{2} a_2^{(1)}; \\
 (2), \quad & a_3^{(2)} = 0 \Rightarrow A_2 a_2^{(2)} + A_1 a_1^{(2)} = 0 \Rightarrow \\
 & a_1^{(2)} = -\frac{A_2}{A_1} a_2^{(2)} = -\frac{(\varepsilon - m)\sqrt{(j-1/2)(j+3/2)}}{4(j+1)\varepsilon - (j+3/2)(\varepsilon - m)} a_2^{(2)}.
 \end{aligned}$$

To simplify the above expression, we may set

$$a_2^{(1)} = \frac{1}{(\varepsilon - m)\sqrt{(j-1/2)(j+3/2)}}, \quad a_2^{(2)} = \frac{1}{(\varepsilon - m)\sqrt{(j-1/2)(j+3/2)}}.$$

Corresponding sets of parameters $b_i^{(1)}$ and $b_i^{(2)}$ may be found with the help of relations (8). It is readily verified that the second constraint $B_1 b_1 + B_2 b_2 + B_3 b_3 = 0$ turns to be identity $0 = 0$ for both solution (1) and (2).

Conclusions. The wave equation for a spin 3/2 particle is solved in spherical coordinates.. Solutions of the radial equations are constructed in the form of linear combinations of Bessel functions. With the use of the known properties of Bessel function, the system of differential equations is transformed to the purely algebraic equations with respect to three quantities a_1, a_2, a_3 . Its solutions may be chosen in various ways as solutions of the simple linear constraint $A_1 a_1 + A_2 a_2 + A_3 a_3 = 0$, where coefficients A_i are expressed through the quantum numbers. Two most simple and symmetric sets are found, $a_i^{(1)}$ and $a_i^{(2)}$. Thus, at fixed quantum numbers $\{\varepsilon, j, m, P\}$ there exists double-degeneration of the quantum states. Explicit form of the operator associated with such degeneration has been not found.

References

1. Pauli W., Fierz M. Über relativistische Feldgleichungen von Teilchen mit beliebigem Spin im elektromagnetischen Feld. *Helvetica Physica Acta*, 1939, bd. 12, ss. 297–300 (in German).
2. Fierz M., Pauli W. On relativistic wave equations for particles of arbitrary spin in an electromagnetic field. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1939, vol. 173, no. 953, pp. 211–232. <https://doi.org/10.1098/rspa.1939.0140>
3. Rarita W., Schwinger J. On a theory of particles with half-integral spin. *Physical Review*, 1941, vol. 60, no. 1, pp. 61–64. <https://doi.org/10.1103/physrev.60.61>
4. Ginzburg V. L. To the theory of particles of spin 3/2. *Zhurnal Eksperimentalnoy i Teoreticheskoy Fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1942, vol. 12, pp. 425–442 (in Russian).
5. Davydov A. S. Wave equation for a particle with spin 3/2, in absence of external field. *Zhurnal Eksperimentalnoy i Teoreticheskoy Fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1943, vol. 13, pp. 313–319 (in Russian).
6. Johnson K., Sudarshan E. C. G. Inconsistency of the local field theory of charged spin 3/2 particles. *Annals of Physics*, 1961, vol. 13, no. 1, pp. 126–145. [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(61\)90030-6](https://doi.org/10.1016/0003-4916(61)90030-6)
7. Bender C. M., McCoy B. M. Peculiarities of a free massless spin 3/2 field theory. *Physical Review*, 1966, vol. 148, no. 4, pp. 1375–1380. <https://doi.org/10.1103/physrev.148.1375>
8. Hagen C. R., Singh L. P. S. Search for consistent interactions of the Rarita–Schwinger field. *Physical Review D*, 1982, vol. 26, pp. 393–398. <https://doi.org/10.1103/physrevd.26.393>
9. Baisya H. L. On the Rarita–Schwinger equation for the vector-spinor field. *Nuclear Physics B*, 1971, vol. 29, no. 1, pp. 104–124. [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(71\)90213-6](https://doi.org/10.1016/0550-3213(71)90213-6)
10. Loide R. K. Equations for a vector-bispinor. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 1984, vol. 17, no. 12, pp. 2535–2550. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/17/12/024>
11. Capri A. Z., Kobes R. L. Further problems in spin 3/2 field theories. *Physical Review D*, 1980, vol. 22, no. 8, pp. 1967–1978. <https://doi.org/10.1103/physrevd.22.1967>
12. Darkhosh T. Is there a solution to the Rarita–Schwinger wave equation in the presence of an external electromagnetic field? *Physical Review D*, 1985, vol. 32, no. 12, pp. 3251–3255. <https://doi.org/10.1103/physrevd.32.3251>
13. Cox W. On the Lagrangian and Hamiltonian constraint algorithms for the Rarita–Schwinger field coupled to an external electromagnetic field. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 1989, vol. 22, no. 10, pp. 1599–1608. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/22/10/015>
14. Deser S., Waldron A., Pascualutsa V. Massive spin 3/2 electrodynamics. *Physical Review D*, 2000, vol. 62, no. 10, paper 105031. <https://doi.org/10.1103/physrevd.62.105031>
15. Napsuciale M., Kirchbach M., Rodriguez S. Spin 3/2 Beyond Rarita–Schwinger Framework. *European Physical Journal A*, 2006, vol. 29, no. 3, pp. 289–306. <https://doi.org/10.1140/epja/i2005-10315-8>
16. Red'kov V. M. *Particle fields in the Riemann space and the Lorents group*. Minsk, 2009. 496 p. (in Russian).
17. Red'kov V. M. *Tetrad formalism, spherical symmetry and Schrodinger's basis*. Minsk, 2011. 339 p. (in Russian).

Information about the authors

Ivashkevich Alina Valentinovna – Student. Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin (28, Studencheskaya Str., 247760, Mozyr, Gomel region, Republic of Belarus). E-mail: ivashkevich.alina@yandex.by.

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

Kisel Vasily Vasilyevich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant professor. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vasiliy_bspu@mail.ru.

Red'kov Viktor Mikhailovich – Ph. D. (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: v.redkov@dragon.bas-net.by.

Информация об авторах

Ивашкевич Алина Валентиновна – студент. Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина (ул. Студенческая, 28, 247760, Мозырь, Гомельская область, Республика Беларусь). E-mail: ivashkevich.alina@yandex.by.

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

Кисель Василий Васильевич – канд. физ.-мат. наук, доцент. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vasiliy_bspu@mail.ru.

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

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

ХИМИЯ
CHEMISTRY

УДК 547.514.4
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-291-297>

Поступило в редакцию 01.10.2018
Received 01.10.2018

Ф. С. Пашковский, Д. И. Корнеев, академик Ф. А. Лахвич

Институт биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**СИНТОНЫ ДЛЯ НОВЫХ 11-ДЕЗОКСИ-3-ОКСА-3,7-ИНТЕР-*m*-ФЕНИЛЕНОВЫХ
АНАЛОГОВ ПРОСТАГЛАНДИНОВ**

Аннотация. Разработана схема синтеза циклопентеноновых синтонов для метаболически стабильных 11-дезоксидеокси-3-окса-3,7-интер-*m*-фениленовых аналогов простагландинов. Ключевой стадией схемы является конденсация циклопентан-1,3-диона с легко доступным метиловым эфиром 3-(формилфеноксидеокси)уксусной кислоты по Кневенагелю в присутствии эфира Ганча.

Ключевые слова: циклопентан-1,3-дион, метиловый эфир 3-(формилфеноксидеокси)уксусной кислоты, эфир Ганча, конденсация по Кневенагелю, циклопентеноновые синтоны, интерфениленовые аналоги простагландинов

Для цитирования: Пашковский, Ф. С. Синтоны для новых 11-дезоксидеокси-3-окса-3,7-интер-*m*-фениленовых аналогов простагландинов / Ф. С. Пашковский, Д. И. Корнеев, Ф. А. Лахвич // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 291–297. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-291-297>

Felix S. Pashkovsky, Dmitry I. Korneev, Academician Fedor A. Lakhvich

Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

SYNTHONS FOR NEW 11-DEOXY-3-OXA-3,7-INTER-*m*-PHENYLENE PROSTAGLANDIN ANALOGUES

Abstract. A synthetic scheme for obtaining cyclopentenone synthons for metabolically stable 11-deoxy-3-oxa-3,7-inter-*m*-phenylene prostaglandin analogues has been developed. The key step of the scheme is the Knoevenagel condensation of cyclopentane-1,3-dione with the readily available 3-(formylphenoxy)acetic acid methyl ester in the presence of Hantzsch ester.

Keywords: cyclopentane-1,3-dione, 3-(formylphenoxy)acetic acid methyl ester, Hantzsch ester, Knoevenagel condensation, cyclopentenone synthons, interphenylene prostaglandin analogues

For citation: Pashkovsky F. S., Korneev D. I., Lakhvich F. A. Synthons for new 11-deoxy-3-oxa-3,7-inter-*m*-phenylene prostaglandin analogues. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 291–297 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-291-297>

Введение. Модифицированные ароматическим фрагментом по боковым цепям аналоги простагландинов (ПГ) и простаглицина находят широкое применение в медицинской и ветеринарной практике. Так, из 14 аналогов ПГ, разрешенных к применению Управлением по контролю за продуктами и лекарствами Министерства здравоохранения США (US Food and Drug Administration), 8 фармсубстанций в своей структуре содержат ароматический цикл [1]. Такие простаглицины используют в гинекологии (сульпростон) [2], в качестве эффективных лекарственных средств для лечения язвы желудка (энпростил) [2], легочно-артериальной гипертензии и болезни периферических артерий (трепростинил [3], берапрост [2; 4]), открытоугольной глаукомы (латанопрост, травопрост, биматопрост, тафлупрост) [5–7]. Препараты клопростенол, флупростенол, фенпростален широко применяют в ветеринарии в качестве лютеолитических агентов [2; 8].

Среди синтетических биоактивных простаглицинов большой интерес представляют 3,7-интерфениленовые [8; 9], а также 3-окса-аналоги [10]. Проявляя высокую биологическую активность, такие простаглицины обладают повышенной метаболической стабильностью за счет устойчивости интерфениленового фрагмента и/либо 3-окса-группы к β-окислению α-цепи – одному из основных направлений метаболического распада ПГ в организме [8]. В связи с этим синтез новых

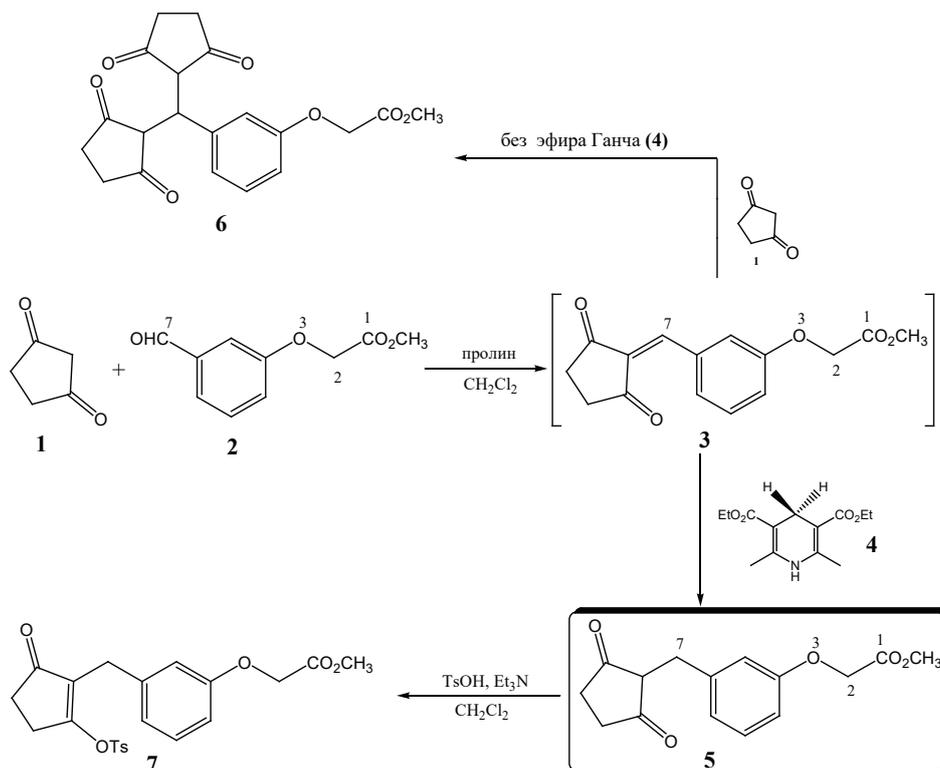
биоактивных метаболически стабильных 3,7-интерфениленовых и 3-окса-аналогов ПГ является важной научной и практической задачей.

Результаты и их обсуждение. Ранее нами на основе тетроновой кислоты и алкоксизамещенных ароматических альдегидов была разработана схема синтеза 3,7-интерфениленовых гетеропростаноидов серии В [11; 12], ключевыми стадиями в которой были конденсация тетроновой кислоты с замещенными ароматическими альдегидами по Кневенагелю и последующее хемоселективное восстановление экзоциклической кросс-сопряженной двойной связи в образующихся при этом 3-арилидентетрагидрофуран-2,4-дионах.

В настоящем сообщении мы описываем синтетическую схему получения циклопентеноновых синтонов для 11-дезоксид-3-окса-3,7-интер-*m*-фениленовых простаноидов на основе циклопентан-1,3-диона (**1**) и метилового эфира 3-(формилфенокси)уксусной кислоты (**2**).

В разработанной нами схеме циклопентан-1,3-дион (**1**) служит предшественником циклической части целевых синтонов, а легко доступный метиловый эфир 3-(формилфенокси)уксусной кислоты (**2**) – предшественником 3-окса-3,7-интер-*m*-фениленовой α -простаноидной цепи. Остаток уксусной кислоты в соединении (**2**) служит фрагментом C^1-C^2 α -цепи, а формильная группа – связующим звеном между α -цепью и циклической частью будущего аналога ПГ и атомом C^7 его углеродного скелета.

«Стыковку» соединений (**1**) и (**2**) можно осуществить путем их конденсации по Кневенагелю с образованием кросс-сопряженного дикетона (**3**). Как указано выше, такой подход мы использовали для получения 3,7-интерфениленовых 3,10(11)-диокса-13-аза- и 9-окса-7-азапростаноидов на основе тетроновой кислоты [11; 12]. Однако в отличие от образующихся при этом 3-арилидентетрагидрофуран-2,4-дионов родственные им кросс-сопряженные дикетоны типа (**3**) являются реакционноспособными соединениями, которые *in situ* реагируют с другой молекулой циклопентан-1,3-диона с образованием михаэлевских аддуктов типа (**6**). Поэтому для предотвращения образования нежелательного аддукта (**6**) в реакционной смеси необходимо присутствие реагента-«ловушки», способного быстро и селективно восстановить реакционноспособную кросс-сопряженную кратную связь в интермедиате (**3**). В предлагаемой нами схеме в качестве такой «ловушки» мы использовали эфир Ганча (**4**). Так, катализируемая пролином конденсация соединений (**1**) и (**2**) по Кневенагелю в присутствии 1,1 экв. эфира Ганча (**4**) привела к β -дикарбонильному соединению (**5**) с выходом 60 %.



Следует отметить, что восстановление эфирами Ганча представляет собой биомиметический процесс, так как он имитирует биохимическое восстановление субстратов ферментами, реакционным центром кофакторов которых является 1,4-дигидропиридиновый гетероцикл (НАДН, НАДФН) [13].

Реакция диона (5) с *p*-толуолсульфонилхлоридом в присутствии 1 экв. триэтиламина с количественным выходом приводит к образованию тозилата (7). Известно, что сопряженная карбонильная группа в тозилатах типа (7) хемоселективно восстанавливается борогидридом натрия с образованием соответствующих аллильных спиртов. Обработка последних дигидратом щавелевой кислоты либо *p*-толуолсульфокислотой во влажном хлороформе приводит к последовательному отщеплению тозильной группы и молекулы воды с образованием циклопентенонов [14].

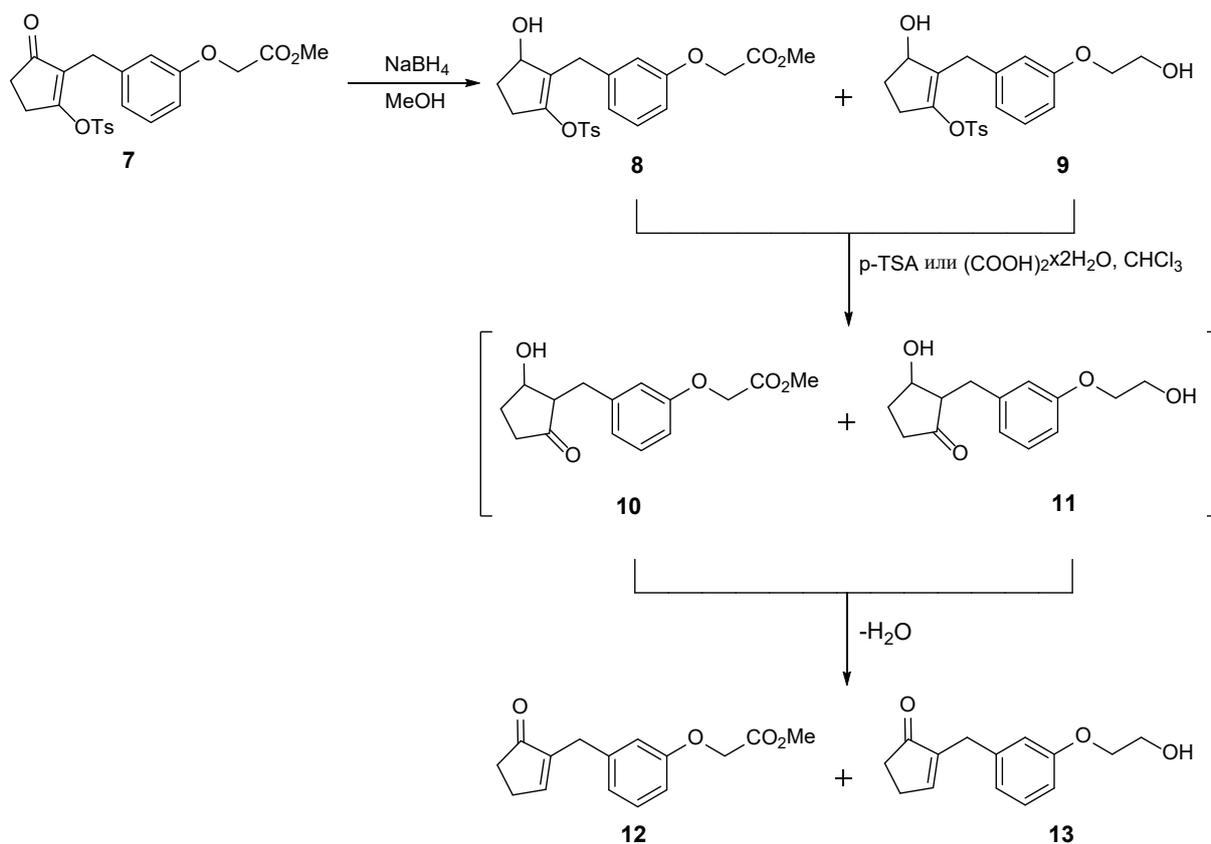
Однако в случае тозилата (7) по указанному методу образуются два продукта реакции, которые были разделены хроматографически. Общим для полученных соединений является то, что в их ИК спектрах наблюдается интенсивная полоса валентных колебаний сопряженной карбонильной группы пятичленного цикла в области 1694–1695 см^{-1} , а в спектрах ЯМР ^1H присутствует однопротонный узкий мультиплет в области 7,14–7,18 м. д., характерный для винильного протона циклопентенонового фрагмента. В спектре ЯМР ^{13}C обоих соединений циклопентеноновому фрагменту отвечают сигналы атома углерода винильной группы =CH при 159,0 м. д. и атома углерода сопряженной карбонильной группы цикла в области 209,1–209,2 м. д.

В ИК спектре хроматографически более подвижного продукта реакции присутствует интенсивная полоса валентных колебаний карбонила сложноэфирной группировки при 1740 см^{-1} . В его спектре ЯМР ^1H наблюдается синглетный трехпротонный сигнал метильной группы сложного эфира в области 3,80 м. д. и двухпротонный синглетный сигнал смежной со сложноэфирной группировкой OCH_2 -группы в области 4,61 м. д. Спектр ЯМР ^{13}C этого соединения характеризуется наличием сигнала первичного атома углерода метильной группы сложного эфира при 52,2 м. д., четырех сигналов вторичных атомов углерода метиленовых групп, а также сигнала атома углерода карбонильной группы сложного эфира при 169,4 м. д. На основании вышеприведенных данных можно сделать вывод, что хроматографически более подвижному продукту реакции отвечает целевой циклопентенон (12). Структура последнего косвенно подтверждается наличием в его масс-спектре пиков ионов 261,1 $[M + \text{H}]^+$ и 283,1 $[M + \text{Na}]^+$.

В ИК спектре хроматографически менее подвижного продукта реакции отсутствует полоса валентных колебаний карбонильной группы сложного эфира, при этом наблюдается широкая полоса в области 3417 см^{-1} , отвечающая валентным колебаниям гидроксильной группы. В его спектре ЯМР ^1H отсутствуют синглетные сигналы протонов метильной группы сложного эфира и OCH_2 -группы. Вместо этого в области 3,95 и 4,06 м. д. наблюдаются два двухпротонных триплета с КССВ 4,5 Гц, а также широкий сигнал при 2,03–2,17 м. д. от протона гидроксигруппы. В спектре ЯМР ^{13}C этого соединения отсутствует сигнал первичного атома углерода метильной группы и сигнал атома углерода карбонильной группы сложного эфира и наблюдаются сигналы вторичных атомов углерода пяти метиленовых групп. Исходя из этого можно заключить, что менее подвижному продукту реакции отвечает первичный спирт (13), образующийся в результате кислотной обработки присутствующего в смеси со сложным эфиром (8) соединения (9). Диол (9) является результатом восстановления сложноэфирной группировки в тозилате (7) борогидридом натрия. Структуру соединения (13) косвенно подтверждает масс-спектр по наличию пика иона 233,1 $[M + \text{H}]^+$ и характерного для спиртов пика $[M - \text{H}_2\text{O} + \text{H}]^+$ (215,0). Образование циклопентеноновых синтонов (12, 13) на основе тозилата (7) отражено на схеме ниже.

Таким образом, нами обнаружен редкий случай восстановления сложноэфирной группировки борогидридом натрия в спиртовом растворе при комнатной температуре, поскольку в большинстве описанных в научной литературе методик сложноэфирная группа характеризуется устойчивостью к борогидридному восстановлению. В нашем случае восстановление сложноэфирной группы при комнатной температуре можно объяснить ее активацией феноксиметиленовой группировкой.

Экспериментальная часть. Температуры плавления полученных соединений измерены на блоке Voëtius. ИК спектры сняты на приборе FT-IR PerkinElmer Spectrum 100 для образцов



в пленке или в таблетках КВг. Спектры ЯМР ¹H (500 МГц) и ¹³C (125,7 МГц) записаны на спектрометре Bruker Avance-500 с использованием остаточного сигнала растворителя в качестве внутреннего стандарта (CDCl₃: 7,26 м. д. для ядер ¹H, 77,0 м. д. для ядер ¹³C; DMSO-*d*₆: 2,50 м. д. для ядер ¹H, 39,5 м. д. для ядер ¹³C; CD₃CO₂D: 2,04 м. д. для ядер ¹H, 20,0 м. д. для ядер ¹³C). Различение сигналов первичных, вторичных, третичных и четвертичных атомов углерода в спектре ¹³C синтезированных веществ проводилось на основании результатов эксперимента DEPT (Distortionless Enhancement by Polarization Transfer). Масс-спектры полученных соединений зарегистрированы на комплексе ВЭЖХ Agilent 1200 с масс-спектрометром типа тройной квадруполь Agilent 6410 в режиме ионизации ESI (электроспрей) с детектированием положительных ионов. Контроль протекания реакций и чистоты всех полученных соединений проводили методом ТСХ на пластинках Silufol UV-254 или Alufol UV-254 (Merck). Для хроматографии использовали силикагель Kieselgel 60 HF254 TLC-стандарт (Merck) и Kieselgel 60 (Fluka).

Метил-2-(3-формилфенокси)ацетат (2) был получен по методу [15] с выходом 95 %. Маслообразное вещество. ИК спектр (ν , см⁻¹): 1765 (C=O сл. эфира), 1710 (C=O аром. альдегида), 1595, 1490, 1460, 1445, 1220 (макс.). Спектр ЯМР ¹H (CDCl₃, δ , м. д.): 3,82 с (3H, CO₂CH₃), 4,70 с (2H, CH₂), 7,23 д. д. (1H_{аром}, ³J 8,0, ⁴J₁ 2,5, ⁴J₂ 1,0 Гц), 7,36 д. д. (1H_{аром}, H², ⁴J₁ 2,5, ⁴J₂ 1,0 Гц), 7,47 т (1H_{аром}, H⁵, ³J 8,0 Гц), 7,51 д. т (1H_{аром}, ³J 7,5, ⁴J₁ 1,0 Гц), 9,97 с (1H, CHO). Спектр ЯМР ¹³C (CDCl₃, δ , м. д.): 52,2 (CO₂CH₃), 65,0 (CH₂), 112,7 (CH_{аром}), 121,9 (CH_{аром}), 124,3 (CH_{аром}), 130,2 (CH_{аром}), 137,7 (C_{аром}), 158,2 (C_{аром}), 168,7 (C=O сл. эфира), 191,7 (CHO).

Метил-2-3-[(2,5-диоксоциклопентил)метил]феноксиацетат (5). К суспензии 0,637 г (6,5 ммоль) циклопентан-1,3-диона (1) в 40 мл дихлорметана при комнатной температуре добавили 2,17 г (13 ммоль) метилового эфира 2-(3-формилфенокси)уксусной кислоты (2), 2,63 г (10,4 ммоль) диэтил-2,6-диметил-1,4-дигидропиридин-3,5-дикарбоксилата (4) и 0,038 г (5 мол. %) *L*-пролина. Реакционную смесь перемешивали в течение 12 ч при комнатной температуре, затем растворитель упаривали в вакууме. Твердый замасленный остаток промывали диэтиловым эфиром для удаления избытка метилового эфира 2-(3-формилфенокси)уксусной кислоты, затем для удаления *L*-пролина остаток промывали водой и твердое вещество растворяли в хлороформе,

раствор сушили сульфатом натрия. После упаривания растворителя продукт реакции выделяли методом колоночной хроматографии на силикагеле (элюент – хлороформ). Получили 0,4 г соединения (**5**) в виде белого кристаллического вещества. Выход: 60 %. Т. пл. 154–156 °С. ИК спектр (ν , см⁻¹): 2740–2423 широк., 1764 (C=O сл. эфира), 1602, 1586, 1439, 1386 (макс.), 1373, 1267, 1224, 1176. Спектр ЯМР ¹H (DMSO-*d*₆, δ , м. д.): 3,28 с (2H, CH₂Ar), 3,34 с (4H, 2CH₂ цикла), 3,69 с (3H, CO₂CH₃), 4,71 с (2H, OCH₂), 6,67 д. д (1H_{аром}, ³J 8,0, ⁴J 2,5 Гц), 6,69 уш. с (1H_{аром}), 6,76 д (1H_{аром}, ³J 8,0 Гц), 7,12 т (1H_{аром}, ³J 8,0 Гц), 11,74 уш. с (1H, OH енола). Спектр ЯМР ¹H (CD₃CO₂D, δ , м. д.): 2,81 с (4H, 2CH₂ цикла), 3,67 с (2H, CH₂Ar), 3,98 с (3H, CO₂CH₃), 4,85 с (2H, OCH₂), 6,89 д. д (1H_{аром}, ³J 8,0, ⁴J 2,0 Гц), 7,00 т (1H_{аром}, ⁴J 2,0 Гц), 7,06 д (1H_{аром}, ³J 8,0 Гц), 7,34 т (1H_{аром}, ³J 8,0 Гц). C₁₅H₁₆O₅. Масс-спектр, *m/z*: 277,1 [M + H]⁺ (100 %), 299,1 [M + Na]⁺, 315,1 [M + K]⁺, 553,2 [2M + H]⁺.

Метил-2-{3-[(5-оксо-2-(тозилокси)циклопент-1-енил)метил]фенокси}ацетат (7). К суспензии 0,4 г (1,45 ммоль) β -дикарбонильного соединения (**5**) в дихлорметане при перемешивании по каплям добавили 0,3 мл (1,45 ммоль) триэтиламина, а затем – 0,414 г (1,45 ммоль) *p*-толуолсульфохлорида. Реакционную смесь перемешивали в течение 6 ч при комнатной температуре и оставляли на ночь. Целевое вещество выделяли методом колоночной хроматографии на силикагеле (элюент – хлороформ). Получено 0,62 г маслообразного продукта реакции. Выход 99 %. ИК спектр (ν , см⁻¹): 1761 (C=O сл. эфира), 1711 (C=O в цикле), 1663, 1599, 1493, 1442, 1386, 1336, 1312, 1269, 1245, 1208, 1171 (макс.), 1094. Спектр ЯМР ¹H (CDCl₃, δ , м. д.): 2,47 с (3H, CH₃), 2,51–2,53 м (2H, CH₂ цикла), 2,90–2,92 м (2H, CH₂ цикла), 3,31 с (2H, CH₂Ar), 3,81 с (3H, CO₂CH₃), 4,58 с (2H, OCH₂), 6,67 т (1H_{аром}, ⁴J 1,5 Гц), 6,70–6,74 м (2H_{аром}), 7,12 т (1H_{аром}, ³J 8,0 Гц), 7,37 д (2H_{аром}, ³J 8,5 Гц), 7,78 д (2H_{аром}, ³J 8,5 Гц). Спектр ЯМР ¹³C (CDCl₃, δ , м. д.): 21,8 (CH₃), 26,9 (CH₂), 27,3 (CH₂), 34,5 (CH₂), 52,2 (CO₂CH₃), 65,2 (OCH₂), 112,5 (CH_{аром}), 114,9 (CH_{аром}), 122,1 (CH_{аром}), 128,0 (2CH_{аром}), 128,9 (C), 129,5 (CH_{аром}), 130,3 (2CH_{аром}), 132,7 (C), 139,6 (C), 146,4 (C), 157,8 (C), 169,4 (C=O сл. эфира), 174,7 (C), 203,8 (C=O в цикле). C₂₂H₂₂O₇S. Масс-спектр, *m/z*: 431,1 [M + H]⁺ (100 %), 453,1 [M + Na]⁺.

Синтез циклопентенонов (12, 13). К раствору 0,6 г (1,4 ммоль) тозилата (**7**) в 4,2 мл метанола по порциям добавляли борогидрид натрия до исчезновения исходного соединения в реакционной смеси (контроль методом ТСХ). Метанол упаривали, к остатку добавляли хлороформ и 1 н. раствор соляной кислоты. Органический слой отделяли, остатки продукта реакции из водной фазы экстрагировали хлороформом. К объединенным экстрактам добавляли *p*-толуолсульфокислоту либо дигидрат щавелевой кислоты и полученную смесь интенсивно перемешивали при комнатной температуре в течение 3 ч. Продукты реакции разделяли колоночной хроматографией на силикагеле (элюент – хлороформ). Масса вещества верхней фракции составила 0,17 г, а нижней фракции – 0,14 г.

Метил-2-{3-[(5-оксоциклопент-1-енил)метил]фенокси}ацетат (12). Маслообразное вещество верхней фракции. Выход 47 %. ИК спектр (ν , см⁻¹): 1740 (C=O сл. эфира, макс.), 1695 (C=O циклопентенона, макс.), 1630, 1600, 1490, 1445, 1260, 1160, 1090, 1050. Спектр ЯМР ¹H (CDCl₃, δ , м. д.): 2,40–2,44 м (2H, CH₂ в цикле), 2,51–2,56 м (2H, CH₂ в цикле), 3,44 уш. с (2H, CH₂Ar), 3,79 с (3H, CO₂CH₃), 4,61 с (2H, OCH₂), 6,73 д. д (1H_{аром}, ³J 8,0, ⁴J 2,0 Гц), 6,75 уш. с (1H_{аром}), 6,83 уш. д (1H_{аром}, ³J 8,0 Гц), 7,14–7,17 узк. м (1H, CH_{винильн}), 7,20 т (1H_{аром}, ³J 8,0 Гц). Спектр ЯМР ¹³C (CDCl₃, δ , м. д.): 26,4 (CH₂), 31,2 (CH₂), 34,5 (CH₂), 52,2 (CO₂CH₃), 65,2 (OCH₂), 112,1 (CH_{аром}), 115,4 (CH_{аром}), 122,4 (CH_{аром}), 129,5 (CH_{аром}), 140,6 (C_{аром}), 145,5 (C), 157,8 (C_{аром}), 159,0 (CH_{винильн}), 169,3 (C=O сл. эфира), 209,1 (C=O в цикле). C₁₅H₁₆O₄. Масс-спектр, *m/z*: 261,1 [M + H]⁺ (100 %), 283,1 [M + Na]⁺.

2-[3-(2-Гидроксиэтокси)бензил]циклопент-2-енон (13). Маслообразное вещество нижней фракции. Выход 46 %. ИК спектр (ν , см⁻¹): 3417 (широк.), 3049, 2925, 2875, 1694 (C=O, макс.), 1630, 1600, 1585, 1491, 1447, 1300, 1261, 1158, 1085, 1052. Спектр ЯМР ¹H (CDCl₃, δ , м. д.): 2,03–2,17 уш. сигнал (1H, OH), 2,42–2,44 м (2H, CH₂ в цикле), 2,53–2,56 м (2H, CH₂ в цикле), 3,45 к (2H, CH₂Ar, ⁴J = ⁵J = 1,0 Гц), 3,95 т (2H, CH₂OH, ³J 4,5 Гц), 4,06 т (2H, OCH₂, ³J 4,5 Гц), 6,75–6,80 м (2H_{аром}), 6,80 уш. д (1H_{аром}, ³J 7,5 Гц), 7,16–7,18 узк. м (1H, CH_{винильн}), 7,20 д. д (1H_{аром}, ³J₁ 8,5, ³J₂ 7,5 Гц). Спектр ЯМР ¹³C (CDCl₃, δ , м. д.): 26,5 (CH₂), 31,3 (CH₂), 34,6 (CH₂), 61,4 (CH₂), 69,0 (OCH₂), 112,2 (CH_{аром}), 115,3 (CH_{аром}), 121,7 (CH_{аром}), 129,5 (CH_{аром}), 140,6 (C_{аром}), 145,7 (C), 158,8 (C_{аром}),

159,0 (CH₂^{винилы}), 209,2 (C=O в цикле). C₁₄H₁₆O₃. Масс-спектр, m/z : 215,0 [M – H₂O + H]⁺, 233,1 [M + H]⁺ (100 %), 255,0 [M + Na]⁺.

Заключение. Нами разработана схема синтеза циклопентеноновых синтонов для новых биоактивных метаболически стабильных 11-дезоксидеокси-3-окса-3,7-интер-*m*-фениленовых аналогов простагландинов, ключевой стадией которой является конденсация циклопентан-1,3-диона с легко доступным метиловым эфиром 3-(формилфенокси)уксусной кислоты по Кневенагелю в присутствии эфира Ганча. Обнаружено, что сложноэфирная группа 3-окса-3,7-интерфениленовой α -цепи склонна к восстановлению борогидридом натрия в мягких условиях за счет ее активации феноксиметиленовой группировкой.

Список использованных источников

1. Ge, Y.-Y. Progress in the Total Synthesis of Prostaglandins / Y.-Y. Ge, Z.-Y. Cai, W.-C. Zhou // *Chin. J. Pharm.* – 2013. – Vol. 44, N 7. – P. 720–728.
2. Collins, P. W. Synthesis of Therapeutically Useful Prostaglandin and Prostacyclin Analogs / P. W. Collins, S. W. Djuric // *Chem. Rev.* – 1993. – Vol. 93, N 4. – P. 1533–1564. <https://doi.org/10.1021/cr00020a007>
3. Budev, M. M. Overview of treprostinil sodium for the treatment of pulmonary arterial hypertension / M. M. Budev, O. A. Minai, A. C. Arroliga // *Drugs Today (Barc).* – 2004. – Vol. 40, N 3. – P. 225–234. <https://doi.org/10.1358/dot.2004.40.3.820086>
4. Melian, E. B. Beraprost: a review of its pharmacology and therapeutic efficacy in the treatment of peripheral arterial disease and pulmonary arterial hypertension / E. B. Melian, K. L. Goa // *Drugs.* – 2002. – Vol. 62, N 1. – P. 107–133. <https://doi.org/10.2165/00003495-200262010-00005>
5. Analytic review of bimatoprost, latanoprost and travoprost in primary open angle glaucoma / S. Holmstrom [et al.] // *Curr. Med. Res. Opin.* – 2005. – Vol. 21, N 11. – P. 1875–1883. <https://doi.org/10.1185/030079905x65600>
6. Curran, M. P. Bimatoprost: a review of its use in open-angle glaucoma and ocular hypertension / M. P. Curran // *Drugs Aging.* – 2009. – Vol. 26, N 12. – P. 1049–1071. <https://doi.org/10.2165/11203210-000000000-00000>
7. Tafluprost for glaucoma / M. Papadia [et al.] // *Expert. Opin. Pharmacother.* – 2011. – Vol. 12, N 15. – P. 2393–2401. <https://doi.org/10.1517/14656566.2011.606810>
8. Простагландины и их аналоги в репродукции животных и человека / Г. А. Толстиков [и др.]. – Уфа, 1989. – 400 с.
9. Простаноиды. XI. Синтез некоторых *o*-интерфенилен-оксааналогов 11-дезоксипростагландина E₁ / Г. А. Толстиков [и др.] // *ЖОрХ.* – 1984. – Т. 20, вып. 11. – С. 2285–2295.
10. Лахвич, Ф. А. Гетеропростаноиды: синтез и биологическая активность / Ф. А. Лахвич, Ф. С. Пашковский, Е. В. Королева // *Усп. хим.* – 1992. – Т. 61, вып. 2. – С. 456–495.
11. Пашковский, Ф. С. Синтез предшественников 3,7-интерфениленовых гетеропростаноидов на основе тетрановых кислот / Ф. С. Пашковский, М. Г. Грибовский, Ф. А. Лахвич // *Докл. Нац. акад. наук Беларуси.* – 2006. – Т. 50, № 3. – С. 69–72.
12. Гетероциклические аналоги простагландинов. IV. Синтез 3,7-интерфениленовых 3,10(11)-диокса-13-азапростаноидов и 9-окса-7-азапростаноидов на основе тетрановой кислоты и ароматических альдегидов / Ф. С. Пашковский [и др.] // *ЖОрХ.* – 2008. – Т. 44, вып. 5. – С. 667–680.
13. Zheng, C. Transfer hydrogenation with Hantzsch esters and related organic hydride donors / C. Zheng, S.-L. You // *Chem. Soc. Rev.* – 2012. – Vol. 41, N 6. – P. 2498–2518. <https://doi.org/10.1039/c1cs15268h>
14. Лахвич, Ф. А. 11-Дезокси-13,15-изоксазолостаноиды с функционализированной α -цепью на основе 2-ацетилциклопентан-1,3-диона и фурфурола / Ф. А. Лахвич, Ф. С. Пашковский, Л. Г. Лис // *ЖОрХ.* – 1992. – Т. 28, вып. 12. – С. 2483–2489.
15. Cheng, M.-F. Liquid-Phase Combinatorial Synthesis of 1,4-Benzodiazepine-2,5-diones as the Candidates of Endothelin Receptor Antagonism / M.-F. Cheng, J.-M. Fang // *J. Comb. Chem.* – 2004. – Vol. 6, N 1. – P. 99–104. <https://doi.org/10.1021/cc030034d>

References

1. Ge Y.-Y., Cai Z.-Y., Zhou W.-C. Progress in the Total Synthesis of Prostaglandins. *Chinese Journal of Pharmaceutics*, 2013, vol. 44, no. 7, pp. 720–728.
2. Collins P. W., Djuric S. W. Synthesis of Therapeutically Useful Prostaglandin and Prostacyclin Analogs. *Chemical Reviews*, 1993, vol. 93, no. 4, pp. 1533–1564. <https://doi.org/10.1021/cr00020a007>
3. Budev M. M., Minai O. A., Arroliga A. C. Overview of treprostinil sodium for the treatment of pulmonary arterial hypertension. *Drugs of Today (Barcelona)*, 2004, vol. 40, no. 3, pp. 225–234. <https://doi.org/10.1358/dot.2004.40.3.820086>
4. Melian E. B., Goa K. L. Beraprost: a review of its pharmacology and therapeutic efficacy in the treatment of peripheral arterial disease and pulmonary arterial hypertension. *Drugs*, 2002, vol. 62, no. 1, pp. 107–133. <https://doi.org/10.2165/00003495-200262010-00005>
5. Holmstrom S., Buchholz P., Walt J., Wickström J., Aagren M. Analytic review of bimatoprost, latanoprost and travoprost in primary open angle glaucoma. *Current Medical Research and Opinion*, 2005, vol. 21, no. 11, pp. 1875–1883. <https://doi.org/10.1185/030079905x65600>

6. Curran M. P. Bimatoprost: a review of its use in open-angle glaucoma and ocular hypertension. *Drugs and Aging*, 2009, vol. 26, no. 12, pp. 1049–1071. <https://doi.org/10.2165/11203210-000000000-00000>
7. Papadia M., Bagnis A., Scotto R., Traverso C. E. Tafluprost for glaucoma. *Expert Opinion on Pharmacotherapy*, 2011, vol. 12, no. 15, pp. 2393–2401. <https://doi.org/10.1517/14656566.2011.606810>
8. Tolstikov G. A., Miftakchov M. S., Lazareva D. N., Pomoinetskii V. D., Sidorov N. N. *Prostaglandins and their analogues in reproduction of animals and humans*. Ufa, 1989. 400 p. (in Russian).
9. Tolstikov G. A., Miftakchov M. S., Adler M. E., Sidorov N. N. Prostanoids. XI. Synthesis of some o-interphenylene-oxa-analogues of 11-deoxyprostaglandin E₁. *Zhurnal Organicheskoi Khimii = Russian Journal of Organic Chemistry*, 1984, vol. 20, no. 11, pp. 2285–2295 (in Russian).
10. Lakhvich F. A., Pashkovsky F. S., Koroleva E. V. Heteroprostanoids: synthesis and biological activity. *Russian Chemical Reviews*, 1992, vol. 61, no. 2, pp. 243–266 <https://doi.org/10.1070/rc1992v061n02abeh000943>
11. Pashkovsky F. S., Gribovsky M. G., Lakhvich F. A. Synthesis of 3,7-interphenylene heteroprostanoid precursors on the basis of tetriconic acids. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2006, vol. 50, no. 3, pp. 69–72 (in Russian).
12. Pashkovskii F. S., Shchukina E. M., Gribovskii M. G., Lakhvich F. A. Heterocyclic analogs of prostaglandines: IV. Synthesis of 3,7-interphenylene 3,10(11)-dioxo-13-azaprostanoids and 9-oxa-7-azaprostanoids based on tetriconic acid and aromatic aldehydes. *Russian Journal of Organic Chemistry*, 2008, vol. 44, no. 5, pp. 657–670. <https://doi.org/10.1134/s1070428008050047>
13. Zheng C., You S.-L. Transfer hydrogenation with Hantzsch esters and related organic hydride donors. *Chemical Society Reviews*, 2012, vol. 41, no. 6, pp. 2498–2518. <https://doi.org/10.1039/c1cs15268h>
14. Lakhvich F. A., Pashkovsky F. S., Liss L. G. 11-Deoxy-13,15-isoxazolooprostanoids with functionalized α -chain on the basis of 2-acetylcyclopentane-1,3-dione and furfural. *Zhurnal Organicheskoi Khimii = Russian Journal of Organic Chemistry*, 1992, vol. 28, no. 12, pp. 2483–2489 (in Russian).
15. Cheng M.-F., Fang J.-M. Liquid-Phase Combinatorial Synthesis of 1,4-Benzodiazepine-2,5-diones as the Candidates of Endothelin Receptor Antagonism. *Journal of Combinatorial Chemistry*, 2004, vol. 6, no. 1, pp. 99–104. <https://doi.org/10.1021/cc030034d>

Информация об авторах

Пашковский Феликс Сигизмундович – канд. хим. наук, заведующий лабораторией. Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Купревича, 5/2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pashkovsky61@mail.ru.

Корнеев Дмитрий Игоревич – мл. науч. сотрудник. Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Купревича, 5/2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nocterumm@gmail.com.

Лажвич Федор Адамович – академик, д-р хим. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Купревича, 5/2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lakhvich@iboch.by.

Information about the authors

Pashkovsky Felix Sigizmundovich – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory. Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (5/2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pashkovsky61@mail.ru.

Korneev Dmitry Igorevich – Junior researcher. Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (5/2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nocterumm@gmail.com.

Lakhvich Fedor Adamovich – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, 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: lakhvich@iboch.by.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 541.183:546.571

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-298-303>

Поступило в редакцию 03.12.2018

Received 03.12.2018

В. И. Грачек, А. П. Поликарпов, А. А. Шункевич, Р. В. Марцынкевич, О. И. Исакович*Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь***СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НОВОГО ХЕЛАТНОГО СОРБЕНТА
ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ***(Представлено академиком А. В. Бильдюкевичем)*

Аннотация. Установлены условия полимераналогичных превращений волокна «нитрон» и получен новый аминокарбоксильный волокнистый катионит ФИБАН X-2. Показано, что ФИБАН X-2 является эффективным сорбентом тяжелых и цветных металлов из многоионных водных растворов, независимо от способа аминирования волокна, за исключением ионов марганца. Катионит, полученный аминированием волокна «нитрон» в паровой фазе, сорбирует Mn^{+2} в 2 раза больше чем ионит, полученный аминированием в водном растворе.

Ключевые слова: волокнистый катионит, сорбция, вода, очистка, марганец

Для цитирования: Синтез и исследование свойств нового хелатного сорбента для очистки воды / В. И. Грачек [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 298–303. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-298-303>

**Valentina I. Grachek, Aliaksandr P. Polikarpov, Aliaksandr A. Shunkevich,
Raisa V. Martsynkevich, Olga I. Isakovich***Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF PROPERTIES OF NEW CHELATE SORBENT
FOR WATER PURIFICATION***(Communicated by Academician Aleksander V. Bilydukevich)*

Abstract. Polymer analogous transformations of a “nitron” fiber were established and a new amino carboxylic fibrous cation exchanger FIBAN X-2 was obtained. It is shown that FIBAN X-2 is an effective sorbent of heavy and non-ferrous metals from multi-ionic aqueous solutions, regardless of the method of fiber amination. The cation exchanger obtained by amination of a “nitron” fiber in the vapor phase absorbs Mn^{+2} twice as much as the ion exchanger obtained by amination in the aqueous solution.

Keywords: fibrous cation exchanger, sorption, water, purification, manganese

For citation: Grachek V. I., Polikarpov A. P., Shunkevich A. A., Martsynkevich R. V., Isakovich O. I. Synthesis and investigation of properties of new chelate sorbent for water purification. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 298–303 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-298-303>

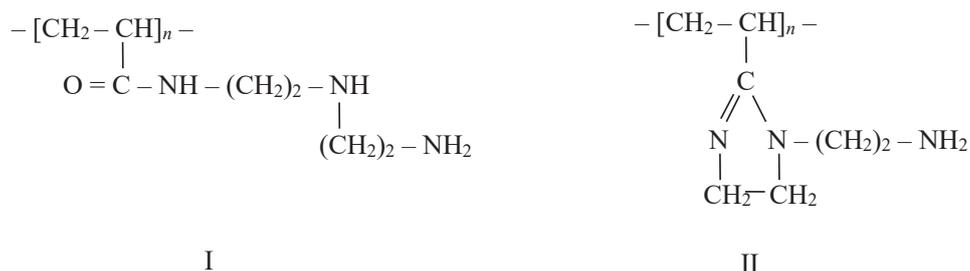
Введение. Стремление синтезировать иониты, обладающие повышенной селективностью к отдельным ионам, привело к появлению ряда полимерных сорбентов, содержащих специфические группировки атомов, называемые хелатообразующие ионообменники [1–3].

Аминокарбоксильные иониты наиболее распространены среди комплексообразующих сорбентов, нашедших применение в практике [4–6]. Такие группы можно ввести в полимерную матрицу путем полимераналогичных превращений.

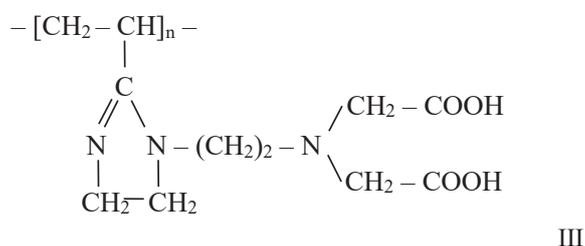
Цель исследования – получить новый аминокарбоксильный волокнистый материал и оценить его ионообменные и сорбционные свойства по катионам тяжелых и цветных металлов. Волокнистые иониты выгодно отличаются от гранулированных полимерных сорбентов высокой скоростью хемосорбции, возможностью применения в различных формах: нить, пряжа, нетканые полотна, кноп.

Материалы и методы исследования. В качестве полимерной матрицы нами использовано волокно «нитрон» (ПАН волокно) Новополоцкого завода «Полимир» ОАО «Нафтан». Волокнистый хелатный сорбент получали в результате двухстадийного синтеза. Первая стадия процесса – аминирование ПАН волокна диэтилентриамином (ДЭТА), вторая стадия процесса – алкилирование аминированного волокна (АВ) монохлоруксусной кислотой или ее натриевой солью. Аминирование ПАН волокна можно проводить двумя методами. Первый метод – это получение АВ в водной среде амина. Второй метод – получение аминированного волокна в паровой фазе. Синтезированный сорбционный материал получил название ФИБАН X-2. Если на первой стадии процесса АВ получали в водной среде, то катионит обозначали буквой «в», т. е. ФИБАН X-2в, если АВ получали в парах амина, катионит обозначали буквой «п» – ФИБАН X-2п.

Ранее методом ИК фурье-спектроскопии исследовано строение аминированных волокон, полученных при разных условиях проведения реакции аминирования ПАН волокна [7]. Поскольку основная область спектра, выбранная для идентификации образцов, 1700–1500 см⁻¹, состоит из ряда широких, асимметричных и плохо разрешимых полос поглощения (ПП), то нами взяты производные спектры, а именно спектры самодеконволюции, которые существенно уменьшают полуширину индивидуальных полос в сложном спектре при сохранении простой колоколообразной формы результирующего контура [8]. Результаты исследований показали, что структуру волокна, полученного аминированием ПАН волокна ДЭТА в водной фазе, можно представить как открытую амидоаминную структуру (I) с незначительной долей имидазолиновой структуры (II), а АВ, полученного в паровой фазе, как имидазолиновую структуру (II) с частично присутствующей амидоаминной структурой (I):



Алкилирование АВ с амидоаминной структурой (I) МХУК-На приводит к получению ФИБАН X-2в тоже с амидоаминной структурой. Алкилирование АВ, полученного в паровой фазе, приводит к получению основного количества ионита ФИБАН X-2п, содержащего в своей структуре, главным образом, имидазолиновое кольцо, структура III:



При изучении сорбции ионов тяжелых металлов использовали синтезированные сорбенты, представленные в таблице.

Характеристики исследуемых ионитов
Characteristics of the studied ion exchangers

Сорбент	ОЕ, мг-экв/г		Набухание в Н ⁺ форме, г/г Н ₂ О
	кислотный	основной	
ФИБАН X-2в	5,7	0,87	0,44
ФИБАН X-2п	5,1	0,8	0,52

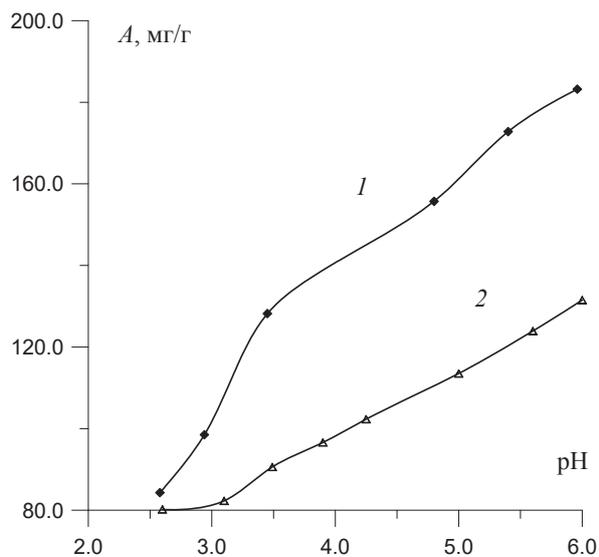


Рис. 1. Исследование зависимости сорбции катионов марганца от pH равновесного раствора на ФИБАН X-2п (1) и ФИБАН X-2в (2)

Fig. 1. Study of the dependence of sorption of manganese cations on the equilibrium solution pH on FIBAN X-2п (1) and FIBAN X-2в (2)

содержащего смесь солей тяжелых металлов: CuCl_2 , NiCl_2 , CoCl_2 , ZnCl_2 , MnCl_2 в концентрации по 0,2 ммоль/л на фоне 0,4 ммоль/л CaCl_2 , но в отсутствии в растворе ионов свинца, так как при добавлении в модельный раствор соли $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ при увеличении pH выпадала в осадок бурая гидроокись марганца. Равновесие сорбции ионов тяжелых металлов характеризуется коэффициентом распределения. Зависимости коэффициентов распределения между ионитом и раствором от pH растворов представлены на рис. 2.

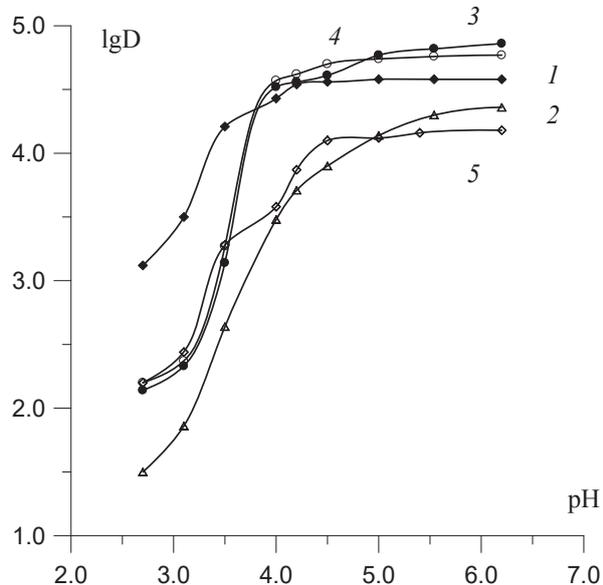


Рис. 2. Зависимость коэффициентов распределения D между ионитом и раствором от pH равновесного раствора: 1 – Cu, 2 – Mn, 3 – Co, 4 – Ni, 5 – Zn на катионите ФИБАН X-2в

Fig. 2. The dependence of the distribution coefficients D between the ionite and the solution on the pH of an equilibrium solution: 1 – Cu, 2 – Mn, 3 – Co, 4 – Ni, 5 – Zn on cation exchanger FIBAN X-2в

Исследование сорбции ионов марганца на ФИБАН X-2в и X-2п в зависимости от pH равновесного раствора приведено на рис. 1. Сорбцию проводили в статических условиях. Степень извлечения металлов рассчитывали по их остаточной концентрации в растворе или по их количеству, найденному после десорбции.

Анализ рис. 1 показал одну особенность: эффективность сорбции марганца у ФИБАН X-2п значительно выше по сравнению с ФИБАН X-2в. При pH 3,0 катионит сорбирует столько марганца, сколько ФИБАН X-2в – при pH 4,0, а при pH 6,0 в два раза больше катионита, полученного на первой стадии из водного раствора.

Таким образом, структура хелатного сорбента ФИБАН X-2п, содержащего имидазольное кольцо (структура III), способствует более высокой сорбционной эффективности ионита по отношению к ионам марганца.

Для сравнения эффективности сорбции катионитом ФИБАН X-2в и X-2п ионов тяжелых металлов из многокомпонентного раствора мы провели исследование из модельного раствора, содержащего смесь солей тяжелых металлов: CuCl_2 , NiCl_2 , CoCl_2 , ZnCl_2 , MnCl_2 в концентрации по 0,2 ммоль/л на фоне 0,4 ммоль/л CaCl_2 , но в отсутствии в растворе ионов свинца, так как при добавлении в модельный раствор соли $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ при увеличении pH выпадала в осадок бурая гидроокись марганца. Равновесие сорбции ионов тяжелых металлов характеризуется коэффициентом распределения. Зависимости коэффициентов распределения между ионитом и раствором от pH растворов представлены на рис. 2. Коэффициенты распределения металлов D между ионитом и раствором рассчитывали по формуле

$$D = \frac{(C_0 - C_p)V}{g_0 C_p}, \text{ мл/г,}$$

где C_0 – концентрация исходного раствора, мг/л; C_p – концентрация равновесного раствора, мг/л; V – объем раствора, мл; g_0 – масса сухой навески ионита, г.

Как видно (рис. 2) коэффициенты распределения для ионов металлов максимальны в области pH 4–6, за исключением ионов марганца, у которых максимум наблюдается при pH 5,5–6,5 и ионов цинка, у которых максимум – при значении pH начиная с 4,5. Для всех ионов в кислой среде коэффициенты распределения имеют невысокие значения. Исключение составляют ионы меди, у которых уже при pH 2,8 довольно высокое значение коэффициента распределения. Характер зависимости D от pH раствора для каждого иона металла можно объяснить процессом комплексообразования

иона металла с аминокарбоксильными группами иона и устойчивостью этих комплексов при различных значениях pH. Коэффициенты распределения характеризуют процесс сорбции микроэлементов. Исследования показали, что все исследуемые металлы образуют устойчивые комплексы с катионитом ФИБАН X-2 в области pH от 4,0 до 6,0, причем независимо от того, в какой среде происходило аминирование нитрона в водной или паровой. Таким образом, сорбция катионитом ионов тяжелых металлов (в том числе и катионов марганца) из многокомпонентного раствора происходит одинаково как для ФИБАН X-2в, так и для ФИБАН X-2п.

Более детально изучена сорбция меди, свинца, никеля и марганца. На рис. 3 приведены их изотермы сорбции. Изотермы сорбции ионов металлов получены методом отдельных навесок в статических условиях на смешанной водородно-натриевой форме ионита ФИБАН X-2п. Перед экспериментом образцы волокнистого ионита приводили в равновесие с 1м раствором NaCl или NaNO₃, pH которого откорректировано до определенного значения (5,0–5,5).

Изотермы имеют выпуклую форму и четко выраженный линейный участок при концентрации меди, не превышающей $1 \cdot 10^{-3}$, концентрации свинца до $2 \cdot 10^{-3}$ и концентрации никеля до $(5-6)10^{-3}$ мг-экв/л. Анализ полученных изотерм показывает, что сорбционная емкость катионита по отношению к ионам исследуемых металлов убывает в следующем ряду: $Pb^{2+} > Cu^{2+} \geq Ni^{2+} > Mn^{2+}$. Исследование кривых позволяет отметить, что ФИБАН X-2 количественно извлекает ионы металлов в широком интервале концентраций.

Исследована возможность десорбции и повторного использования сорбента для концентрирования. Установлено, что все сорбированные металлы можно полностью элюировать 0,5 н раствором соляной кислоты за исключением ионов свинца, которые десорбируются 0,5 н раствором азотной кислоты.

Испытания сорбции катионов марганца в динамических условиях в зависимости от скорости потока проводили на колонках, имеющих следующие параметры: площадь поперечного сечения – 1,22 см², высота слоя сорбента – 2,8 см, навеска сорбента ~0,8 г. Перед сорбцией сорбент приводили в равновесие с водопроводной водой до pH воды 8–8,2. Сорбцию Mn²⁺ проводили из водопроводной воды при концентрациях марганца в воде 0,2 мг/л, что в 2 раза выше ПДК.

Линейные скорости потока задавались перистальтическим насосом от 9 до 200 см/мин, т. е. время контакта раствора с волокном изменялось от 44 до 0,45 с. Объем фильтрата для каждой скорости составлял 5 л, объем отбираемой пробы – 0,5 л. Изменение скорости подачи раствора проводили на одной и той же навеске сорбента. Концентрации марганца анализировали атомно – адсорбционным методом на спектрометре с индуктивно связанной плазмой. Результаты иссле-

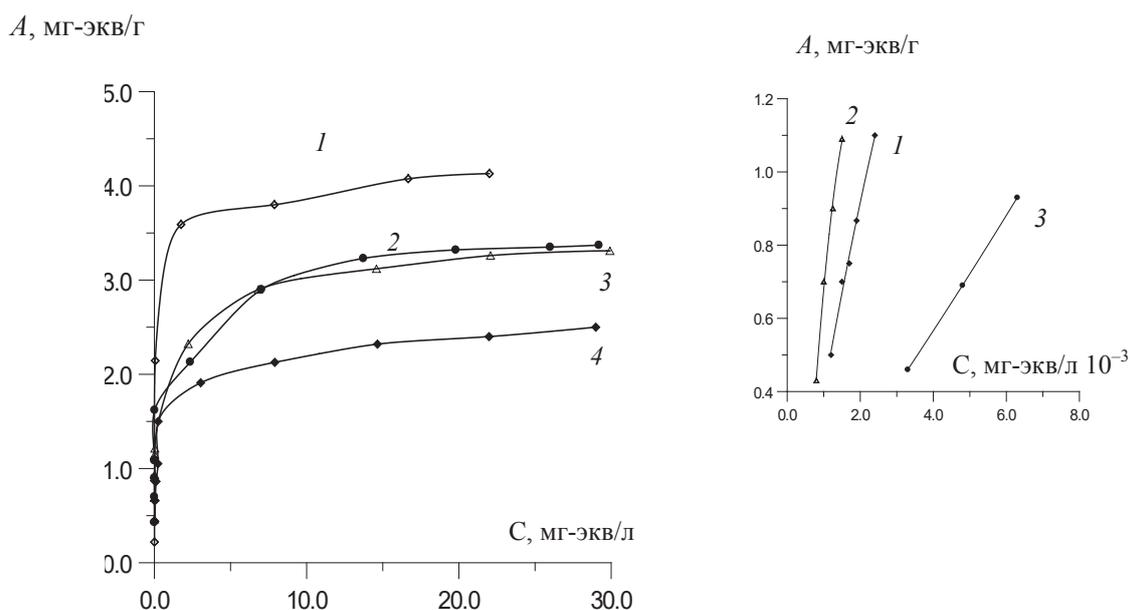


Рис. 3. Изотермы сорбции: 1 – Pb, 2 – Cu, 3 – Ni, 4 – Mn на катионите ФИБАН X-2

Fig. 3. Sorption isotherms: 1 – Pb, 2 – Cu, 3 – Ni, 4 – Mn on cation exchanger FIBAN X-2

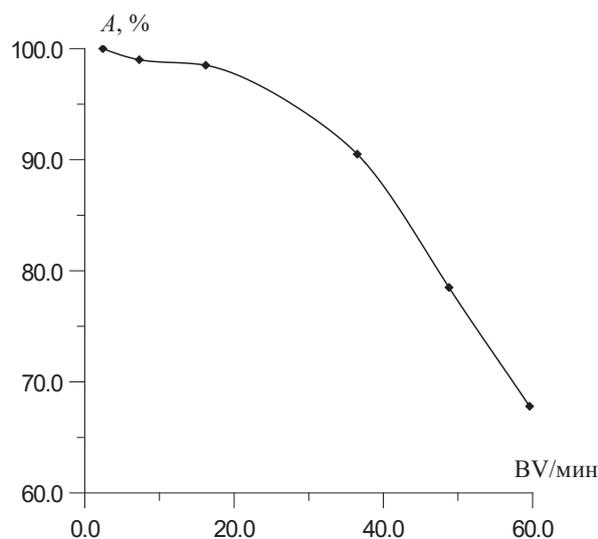


Рис. 4. Результаты испытаний катионита ФИБАН X-2 по очистке питьевой воды от ионов марганца в зависимости от скорости потока очищаемой воды. A – степень очистки, BV/мин – скорость, колоночные объемы в минуту

Fig. 4. Results of cation exchanger FIBAN X-2 tests for purification of drinking water from manganese ions, depending on the flow rate of the treated water. A – purification rate, BV/min – velocity, column volumes per minute

трон» получен новый аминокарбоксильный волокнистый катионит ФИБАН X-2. Первая стадия синтеза может осуществляться как в паровой, так и в водной средах. Структура хелатного катионита ФИБАН X-2 зависит от условий синтеза первой стадии. Катионит, полученный на первой стадии аминированием волокна «нитрон» в паровой фазе, является эффективным сорбентом ионов марганца. Катионит ФИБАН X-2 является также эффективным сорбентом других тяжелых и цветных металлов из многоионных водных растворов, независимо от способа аминирования волокна.

Список использованных источников

1. Блохин, А. А. Ионообменное извлечение палладия (II) из хлоридных растворов сложного состава / А. А. Блохин, Н. Д. Абовский, Ю. В. Мурашкин // Журн. прикладной химии. – 2007. – Т. 80, № 7. – С. 1089–1093.
2. Efficiency and mechanism of new poly(acryl-phenylamidrazone phenylhydrazide) chelating fiber for adsorbing trace Ga, In, Bi, V and Ti from solution / Xijun Chang [et al.] // Anal. Chim. Acta. – 2001. – Vol. 450, N 1–2. – P. 231–238. [https://doi.org/10.1016/s0003-2670\(01\)01387-3](https://doi.org/10.1016/s0003-2670(01)01387-3)
3. Байгозин, Д. В. Изучение сорбции тяжелых металлов в присутствии конкурирующих ионов на трех ионообменных смолах и волокнистом ионообменном материале в модельных условиях / Д. В. Байгозин, Ю. А. Ситникова, А. Г. Митилинеос // Вода: химия и экология. – 2011. – № 11. – С. 64–70.
4. Chiarle, S. Mercury removal from water by ion exchange resins adsorption / S. Chiarle, M. Ratto, M. Rovatti // Wat. Res. – 2000. – Vol. 34, N 11. – P. 2971–2978. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(00\)00044-0](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(00)00044-0)
5. Akio, Yuchi. Adsorption of tetravalent metal ions to chelating resins containing iminodiacetic acid groups / Akio Yuchi, Norihito Yoshida // Bull. Chem. Soc. Jap. – 2000. – Vol. 73, N 8. – P. 1841–1842. <https://doi.org/10.1246/bcsj.73.1841>
6. Yahorava, V. Ion exchange technology for the efficient recovery of precious metals from waste and low-grade streams / V. Yahorava, M. Kotze // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2014. – Vol. 114. – P. 173–181.
7. Исследование строения хелатных волокнистых ионитов методом ИК спектроскопии / В. И. Грачек [и др.] // Журн. общей химии. – 2009. – Т. 79, № 3. – С. 360–365.
8. Никоненко, Н. А. Спектральные характеристики углеводов на основе математической обработки ИК спектров / Н. А. Никоненко. – Минск, 2000. – 21 с.

References

1. Blokhin A. A., Abovskii N. D., Murashkin Yu. V. Ion-exchange recovery of palladium(II) from multicomponent chloride solutions. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2007, vol. 80, no. 7, pp. 1058–1062. <https://doi.org/10.1134/s1070427207070087>

дований представлены на рис. 4. Из рис. 4 видно, что катионит очищает водопроводную воду от ионов марганца при скорости до 20 колоночных объемов в минуту практически на 100 %, с увеличением скорости потока воды до ~40 колоночных объемов в минуту степень очистки уменьшается, но остается достаточно высокой – 85 %. Дальнейшее увеличение скорости потока до 60 колоночных объемов в минуту, т. е. при времени контакта волокна с потоком ≤ 1 с очистка воды от ионов марганца составляет 68 %.

Проведенные испытания показали, что катионит ФИБАН X-2 очищает питьевую воду, содержащую ионы марганца в количестве, в 2 раза превышающем значение ПДК, при высоких скоростях потока очищаемой воды (BV/мин ~ 60), при контакте пряжи с водой ≤ 1 с. Несмотря на то что питьевая вода кроме ионов марганца содержит еще ионы Ca^{2+} , Mg^{2+} и других металлов, которые конкурируют в сорбционных процессах при очистке питьевой воды.

Закключение. Таким образом, в результате двухстадийного синтеза на основе волокна «нитрон»

2. Xijun Chang, Xiulan Yang, Xinjie Wei, Kangbing Wu. Efficiency and mechanism of new poly(acryl-phenylamidrazone phenylhydrazide) chelating fiber for adsorbing trace Ga, In, Bi, V and Ti from solution. *Analytica Chimica Acta*, 2001, vol. 450, no. 1–2, pp. 231–238. [https://doi.org/10.1016/s0003-2670\(01\)01387-3](https://doi.org/10.1016/s0003-2670(01)01387-3)

3. Baygozin D. V., Sitnikova Yu. A., Mitilineos A. G. Study of heavy metal sorption in the presence of competing ions on the three ion-exchange resins and ion-exchange fibrous material. *Voda: khimiya i ekologiya = Water: chemistry and ecology*, 2011, no. 11, pp. 64–70 (in Russian).

4. Chiarle S., Ratto M., Rovatti M. Mercury removal from water by ion exchange resins adsorption *Water Research*, 2000, vol. 34, no. 11, pp. 2971–2978. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(00\)00044-0](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(00)00044-0)

5. Akio Yuchi, Norihito Yoshida. Adsorption of tetravalent metal ions to chelating resins containing iminodiacetic acid groups. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 2000, vol. 73, no. 8, pp. 1841–1842. <https://doi.org/10.1246/bcsj.73.1841>

6. Yahorava V., Kotze M., Macheru P. Ion exchange technology for the efficient recovery of precious metals from waste and low-grade streams. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2014, vol. 114, pp. 173–181.

7. Grachek V. I., Lysenko G. N., Akylich Z. I., Isakovich O. I., Shunkevich A. A. Investigation of structure chelating fiber ion exchange by method IR snectroscopy. *Russian Journal of General Chemistry*, 2009, vol. 79, no. 3, pp. 350–355. <https://doi.org/10.1134/s1070363209030037>.

8. Nikonenko N. A. *Spectral characteristics of carbohydrates on the of mathematical treatment of IR Spectra*. Minsk, 2000. 21 p. (in Russian).

Информация об авторах

Грачек Валентина Ивановна – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: grachek@ifoch.bas-net.by.

Поликарпов Александр Петрович – канд. хим. наук, заведующий лабораторией. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: fiban@ifoch.bas-net.by.

Шункевич Александр Акимович – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shunkevich@ifoch.bas-net.by.

Марцынкевич Раиса Владимировна – канд. хим. наук, науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Исакович Ольга Ивановна – науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Information about the authors

Grachek Valentina Ivanovna – Ph. D. (Chemistry), Leading researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: grachek@ifoch.bas-net.by.

Polikarpov Aliaksandr Petrovich – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fiban@ifoch.bas-net.by.

Shunkevich Aliaksandr Akimovich – Ph. D. (Chemistry), Leading researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shunkevich@ifoch.bas-net.by.

Martsynkevich Raisa Vladimirovna – Ph. D. (Chemistry), Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Isakovich Olga Ivanovna – Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 547.92:577.11:632.9

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-304-311>

Поступило в редакцию 06.02.2019

Received 06.02.2019

Н. Е. Манжелесова¹, Р. П. Литвиновская², С. Н. Полянская¹,
Л. А. Корытько¹, О. П. Савочка²

¹Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

²Институт биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ЗАЩИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ САЛИЦИЛАТОВ БРАССИНОСТЕРОИДОВ НА РАСТЕНИЯ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ, ПОДВЕРГНУТЫЕ БИОТИЧЕСКОМУ СТРЕССУ

(Представлено академиком В. А. Хрипачом)

Аннотация. В лабораторных опытах выявлено, что салицилаты 24-эпибрассинолида, 24-эпикастастерона и впервые синтезированный салицилат 6-дезоксид-24-эпикастастерона улучшают посевные качества семян ярового ячменя и действуют как индукторы иммунитета растений в условиях биотического стресса. В мелкоделяночных опытах показано, что обработка растений салицилатами брассиностероидов в фазу выхода в трубку оказывает стимулирующее действие на формирование защитных физиолого-биохимических реакций растений. Наиболее активное защитное действие проявил салицилат 24-эпибрассинолида.

Ключевые слова: салицилаты брассиностероидов, регуляция роста и развития, биотический стресс, индукция иммунитета, яровой ячмень

Для цитирования: Защитное действие салицилатов брассиностероидов на растения ярового ячменя, подвергнутые биотическому стрессу / Н. Е. Манжелесова [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 304–311. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-304-311>

Neli E. Manzhalesava², Raisa P. Litvinovskaya¹, Svetlana N. Poljanskaja², Larisa A. Karytsko², Aleh P. Savachka¹

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

²V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

PROTECTIVE EFFECT OF BRASINOSTEROID SALICYLATES ON SPRING BARLEY PLANTS EXPOSED TO BIOTIC STRESS

(Communicated by Academician Vladimir A. Khrpach)

Abstract. In laboratory experiments, salicylates 24-epibrassinolide, 24-epicastasterone and the first synthesized 6-deoxo-24-epicastasterone salicylate act as inducers of plant immunity under biotic stress on the model phytopathosystem of barley-phytopathogenic fungus *Helminthosporium teres* Sacc. In small-scale field experiments, it was shown that the treatment of plants with brassinosteroid salicylates has a stimulating effect on the formation of protective physiological and biochemical reactions of plants. The most active protective effect exhibited salicylate 24-epibrassinolide.

Keywords: brassinosteroid salicylates, growth and development regulation, biotic stress, induce of immunity, spring barley

For citation: Manzhalesava N. E., Litvinovskaya R. P., Poljanskaja S. N., Karytsko L. A., Savachka A. P. Protective effect of brassinosteroid salicylates on spring barley plants exposed to biotic stress. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 304–311 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-304-311>

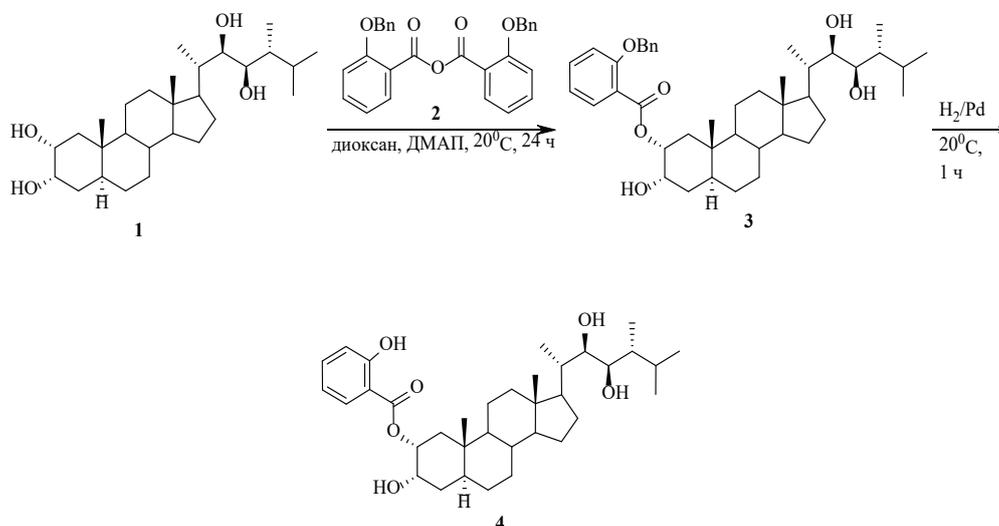
Введение. В условиях адаптивного земледелия получение высоких урожаев и экологически чистой сельхозпродукции при условии обеспечения безопасности окружающей среды ставит задачу максимальной экологизации средств защиты растений. Вместо синтетических препаратов фунгицидного действия все чаще предлагаются физиологически активные природные соединения и их производные с регуляторной активностью, способные, в частности, влиять на взаимоотношения патогенов с растениями в нужном направлении. В этом плане актуальным является использование фитогормональных стероидов – брассиностероидов, стимуляторов урожайности

нового поколения со стабильными биорегуляторными свойствами, экологически безопасных в применении, с широким спектром физиологической активности. На клеточном уровне это проявляется в стимуляции биосинтеза белка и нуклеиновых кислот, а также в изменении белкового спектра и аминокислотного состава синтезируемых белков, в способности изменять химический состав и свойства мембран, что приводит к стимуляции роста, улучшению фертильности, сокращению периода вегетативного роста, увеличению размера и числа плодов, улучшению пищевой ценности и качества плодов, повышению урожайности [1; 2]. В то же время brassinosterоиды обладают антистрессовыми, адаптогенными свойствами, повышающими устойчивость растений ко многим видам стресса [3; 4]. Ранее мы показали, что интересными с этой точки зрения являются конъюгаты brassinosterоидов (24-эпибрассинолида и 24-эпикастастерона) с салициловой кислотой [5]. Синтезированные соединения повышали выживание проростков проса при действии теплового и солевого стресса и уменьшали накопление в них продуктов перекисдного окисления липидов. При этом действие полученных конъюгатов заметно превосходило эффекты соответствующих brassinosterоидов, салициловой кислоты и смеси этих фитогормонов.

Цель исследования – изучение защитного действия салицилатов brassinosterоидов группы 24-эпибрассинолида на растения ячменя, включая растения, подвергнутые биотическому стрессу.

Материалы и методы исследования. УФ-спектры сняты на приборе Specord UV VIS в метиловом спирте. ИК спектры получены на приборе Spectrum 100 (PerkinElmer) в KBr или пленке. Спектры ЯМР ^1H и ^{13}C записаны на приборе Bruker Avance DRX-500 (рабочая частота 500 МГц для ^1H и 125 МГц для ^{13}C) с использованием остаточного пика растворителя в качестве внутреннего стандарта (δ_{H} 7,26 м. д. и δ_{C} 77,16 м. д. для CDCl_3). Масс-спектры получены на масс-спектрометре LCQ Fleet (Thermo Electron Corporation) при регистрации положительных ионов в режиме химической ионизации при атмосферном давлении (APCI). Масс-спектры высокого разрешения получены на приборе Thermo Fisher Scientific LTQ Orbitrap Velos электроспреей ионизацией. Протекание реакций контролировали методом ТСХ на пластинках Kieselgel 60 F₂₅₄ с визуализацией путем обработки анисовым проявителем с последующим нагреванием или под УФ-лампой. Хроматографическое разделение реакционных смесей осуществляли на силикагеле 40/60 (Kieselgel 60, Merck).

Скринингу в лабораторных условиях подвергнуты салицилаты 24-эпикастастерона (ЭК) и 24-эпибрассинолида (ЭБ), полученные нами ранее [5], а также салицилат 6-дезоксо-24-эпикастастерона (ДОКС) **4**, синтез которого осуществлен для данного исследования из 6-дезоксо-24-эпикастастерона **1** [6]. Схема синтеза включала взаимодействие 6-дезоксо-24-эпикастастерона **1** с ангидридом 2-О-бензилсалициловой кислоты **2** [7], полученным *in situ* из кислоты, с последующим гидрогенолизом соединения **3** на палладиевом катализаторе для удаления бензильной защиты.



(22R,23R)-2 α -(2'-Бензилоксибензоилокси)-3 α ,22,23-тригидрокси-5 α -эргостан 3. Ангидрид 2-(бензилокси)бензойной кислоты, полученный из 100 мг (0,44 ммоль) кислоты и 45 мг (0,22 ммоль) дициклогексилкарбодиимида, в 2 мл безводного диоксана добавляли к смеси 2,4 мг (0,02 ммоль) диметиламинопиридина и 100 мг (0,22 ммоль) 6-дезоксо-24-эпикастастерона **1**. Полученный раствор перемешивали при 20 °С в течение 24 ч. Растворитель удаляли в вакууме, остаток хроматографировали на силикагеле (элюент петролейный эфир–EtOAc, 10 : 1). Получили 71 мг (49 %) соединения **3** в виде белого аморфного порошка. Т. пл. 90–92 °С (гексан). УФ спектр (MeOH, λ_{\max} , нм) (ϵ): 211 (14961), 234 (пл.), 291 (1957). ИК спектр (KBr, ν , см⁻¹): 3447, 2931, 2868, 1709, 1451, 1302, 1249. Спектр ЯМР ¹H (CDCl₃, δ , м. д., J/Гц): 0,68 (3H, с, H-18), 0,83–0,86 (6H, м, H-26, H-27), 0,87 (3H, с, H-19), 0,91 (3H, д, J = 7,0, H-28), 0,96 (3H, д, J = 6,0, H-21), 3,41 (1H, м, H-23), 3,71 (1H, м, H-22), 4,05 (1H, м, H-3), 5,16 (2H, с, OCH₂Ph), 5,18 (1H, м, H-2), 6,98–7,02 (2H, м, H-3', 5'), 7,31–7,45 (6H, м, H-4', OCH₂Ph), 7,79 (1H, дд, J = 8,0, 2,0, H-6'). Спектр ЯМР ¹³C (CDCl₃, δ , м. д.): 166,21(с), 157,88 (с), 136,28 (с), 133,58 (д), 131,95 (д), 128,85 (2д), 128,39 (д), 127,62 (2д), 121,18 (с), 120,86 (д), 113,67 (д), 76,49 (д), 73,85 (д), 73,03 (д), 71,02 (т), 67,42 (д), 56,39 (д), 54,21 (д), 52,90 (д), 42,59 (с), 41,48 (д), 40,31 (д), 40,03 (т), 38,16 (д), 37,21 (с), 37,14 (т), 34,97 (д), 33,75 (т), 31,86 (т), 28,07 (т), 27,66 (т), 27,11 (д), 24,24 (т), 22,30 (к), 21,08 (т), 17,47 (к), 12,58 (к), 12,44 (к), 12,05 (к), 11,01 (к). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 661 [M+H]⁺ (37), 415 [M–ArCOOH–H₂O+H]⁺ (75), 397 [M–ArCOOH–2H₂O+H]⁺ (100), 271 (28). Найдено: m/z 660,4390 [M]⁺. C₄₂H₆₀O₆. Вычислено: M 660,4390.

(22R,23R)-2 α -(2'-Гидроксибензоилокси)-3 α ,22,23-тригидрокси-5 α -эргостан 4 (салицилат 6-дезоксо-24-эпикастастерона). К раствору соединения **3** (71 мг, 0,11 ммоль) в метаноле (2 мл) прибавляли 5 %-ный палладий на угле в качестве катализатора (24 мг) и перемешивали в токе водорода в течение 1 ч. Катализатор отфильтровывали через слой силикагеля, растворитель упаривали в вакууме. Получили 59 мг (95 %) монопроизводного **4** в виде белого аморфного порошка. Т. пл. 113–115 °С (гексан). УФ спектр (MeOH, λ_{\max} , нм) (ϵ): 214 (7143), 239 (6604), 306 (3432). ИК спектр (KBr, ν , см⁻¹): 3438, 2931, 2871, 1673, 1302. Спектр ¹H ЯМР (500 МГц, CDCl₃, δ , м. д., J/Гц): 0,68 (с, 3H, H-18), 0,84 (д, J = 7,0 Гц, 3H, H-26), 0,86 (д, J = 7,0 Гц, 3H, H-27), 0,91 (д, J = 7,0 Гц, 3H, H-28), 0,92 (с, 3H, H-19), 0,95 (д, J = 6,0 Гц, 3H, H-21), 3,40 (м, 1H, H-23), 3,71 (м, 1H, H-22), 4,20 (м, 1H, H-3), 5,22 (м, 1H, H-2), 6,88 (м, 1H, H-5'), 6,98 (д, J = 8,0 Гц, 1H, H-3'), 7,46 (м, 1H, H-4'), 7,84 (д, J = 8,0 Гц, 1H, H-6'). Спектр ЯМР ¹³C (125 МГц, CDCl₃): 169,39 (с), 161,85 (с), 135,99 (д), 129,92 (д), 119,33 (д), 117,83 (д), 112,64 (с), 76,48 (д), 74,48 (д), 72,98 (д), 67,64 (д), 56,33 (д), 54,23 (д), 52,88 (д), 42,58 (с), 41,51 (д), 40,33 (д), 39,94 (т), 38,26 (д), 37,39 (с), 37,24 (т), 34,98 (д), 34,32 (т), 31,84 (т), 28,06 (т), 27,63 (т), 27,11 (д), 24,23 (т), 22,27 (к), 21,14 (т), 17,44 (к), 12,57 (к), 12,51 (к), 12,04 (к), 10,98 (к). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 571 [M+H]⁺ (35), 415 [M–ArCOOH–H₂O+H]⁺ (83), 397 [M–ArCOOH–2H₂O+H]⁺ (100), 271 (16). Найдено: m/z 570,3920 [M]⁺. C₃₅H₅₄O₆. Вычислено: M 570,3920.

Исследование физиологического влияния конъюгатов брассиностероидов с салициловой кислотой на растения ярового ячменя. Объектами исследования служили растения ярового ячменя, выращенные в лабораторных и полевых условиях. Определение индуцирующей устойчивость растений к болезням активности фитогормональных стероидов проводили также в лабораторных условиях на модельной фитопатосистеме ячмень–фитопатогенный гриб *Helminthosporium teres* Sacc., возбудитель сетчатой пятнистости растений ячменя. Использовали споры ленинградской популяция гриба, культивированного в лаборатории физиологии патогенеза и болезнеустойчивости растений Института экспериментальной ботаники НАН Беларуси. Ячмень выращивали до возраста двух листьев. Первые листья разрезали на отрезки длиной по 4 см и раскладывали в кюветы на фильтровальную бумагу, смоченную 0,004 %-ным раствором бензидазола. На каждый отрезок наносили 40 мкл исследуемых веществ и равномерно распределяли их шпателем по поверхности, а через сутки в центр отрезка помещали каплю суспензии спор гриба с инфекционной нагрузкой 4–6 тыс/мл. Контролем служили отрезки листьев, обработанные водой и спорами гриба. Реакцию растений на заражение учитывали на 5-е сутки после инокуляции по 5-балльной шкале: 0 – отсутствие симптомов болезни, 1 – точечный некроз без хлороза; 2 – некроз с хлорозом или без него, ограниченный диаметром инфекционной капли; 3 – некроз с хлорозом, распространяющийся по отрезку листа; 4 – окаймленный некроз, занимающий всю поверхность отрезка листа [8].

Полевые мелкоделяночные опыты закладывали на экспериментальной базе научно-практического центра по земледелию НАН Беларуси (г. Жодино), используя принятую методику закладки и технологию выращивания ярового ячменя. Обработку посевов салицилатами брассиностероидов проводили путем опрыскивания по вегетирующей массе. Содержание фотосинтетических пигментов изучали по методу, описанному В. Д. Гавриленко и соавт. [9]. Изменение проницаемости мембран анализировали по выходу водорастворимых веществ из листьев растений [10]. Контрольные и опытные образцы помещали в дистиллированную воду (соотношение воды и навески 50 : 1), инкубировали в ней 2–4 ч, затем образцы удаляли и проводили измерения с помощью кондуктометра, при этом учитывались показания чистой воды. Интенсивность перекисного окисления липидов мембран оценивали по способности 2-тиобарбитуровой кислоты (ТБК) связываться с липидными перекисями по методике, описанной в [11].

Семенную инфекцию определяли по утвержденному методу¹. Эксперименты повторяли независимо трижды при 3–4-кратной повторности в каждой серии. В биохимических анализах повторность включала усредненную пробу из 8–10 растений. На рисунках и в таблицах представлены средние арифметические и их среднеквадратические ошибки ($M \pm m$).

Результаты и их обсуждение. В лабораторных опытах изучалось фитозащитное действие салицилатов брассиностероидов. В контрольном варианте степень развития болезни оценивалась в 4 балла, в вариантах с использованием салицилатов 24-эпибрассинолида и 24-эпикастастерона в самых малых концентрациях 10^{-8} М и 10^{-9} М – в 1 балл (практически полное ингибирование инфекции), а салицилата 6-дезоксо-24-эпикастастерона – в 2 балла (табл. 1, рис. 1). В то же время более высокие дозы соединений (10^{-6} М и 10^{-7} М) были неактивны в отношении фитопатогенного гриба.

Т а б л и ц а 1. Влияние модифицированных фитогормональных стероидов на проявление симптомов сетчатого гельминтоспориоза ячменя (5-е сутки после заражения)

Table 1. Influence of modified phytohormonal steroids on symptom expression of barley net blotch *in vitro* experiments on the barley leaf cuts (5th day after infection)

Вариант Variant	Характеристика поражения Lesion characteristic
Контроль (вода)	Окаймленный некроз, распространяющийся по отрезку листа – 3 балла
Салицилат ЭК, 10^{-6} М	Окаймленный некроз, занимающий всю поверхность отрезка листа – 4 балла
Салицилат ЭК, 10^{-7} М	Окаймленный некроз, распространяющийся по отрезку листа – 3 балла
Салицилат ЭК, 10^{-8} М	Некроз с хлорозом, ограниченный диаметром инфекционной капли – 2 балла
Салицилат ЭК, 10^{-9} М	Точечный некроз без хлороза – 1 балл
Салицилат ЭБ, 10^{-6} М	Окаймленный некроз, занимающий всю поверхность отрезка листа – 4 балла
Салицилат ЭБ, 10^{-7} М	Окаймленный некроз, распространяющийся по отрезку листа – 3 балла
Салицилат ЭБ, 10^{-8} М	Точечный некроз без хлороза – 1 балл
Салицилат ЭБ, 10^{-9} М	Точечный некроз без хлороза – 1 балл
Салицилат ДОЭК, 10^{-6} М	Окаймленный некроз, распространяющийся по отрезку листа – 3 балла
Салицилат ДОЭК, 10^{-7} М	Окаймленный некроз, распространяющийся по отрезку листа – 3 балла
Салицилат ДОЭК, 10^{-8} М	Некроз с хлорозом, ограниченный диаметром инфекционной капли – 2 балла
Салицилат ДОЭК, 10^{-9} М	Некроз с хлорозом, ограниченный диаметром инфекционной капли – 2 балла

Полученные данные могут свидетельствовать о том, что салицилаты брассиностероидов действуют не как фунгициды, а как индукторы иммунитета растений, т. е. не по принципу биоцидности (гибели патогена), а через стимуляцию синтеза в растениях веществ, повышающих устойчивость растения [12].

Исходя из результатов лабораторных опытов, для выяснения особенностей действия веществ на растения ярового ячменя в полевых мелкоделяночных опытах изучали салицилаты брассиностероидов в концентрациях 10^{-6} М и 10^{-8} М (наименее и наиболее активные концентрации при ингибировании инфекции в лабораторных условиях). Опрыскивание растений проводили в фазу выхода в трубку. Учет развития грибных болезней на культурных злаках по морфологическим

¹ Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения зараженности болезнями: ГОСТ 12044–93. – Введ. 01.01.1995. – М., 2004. – 42 с.

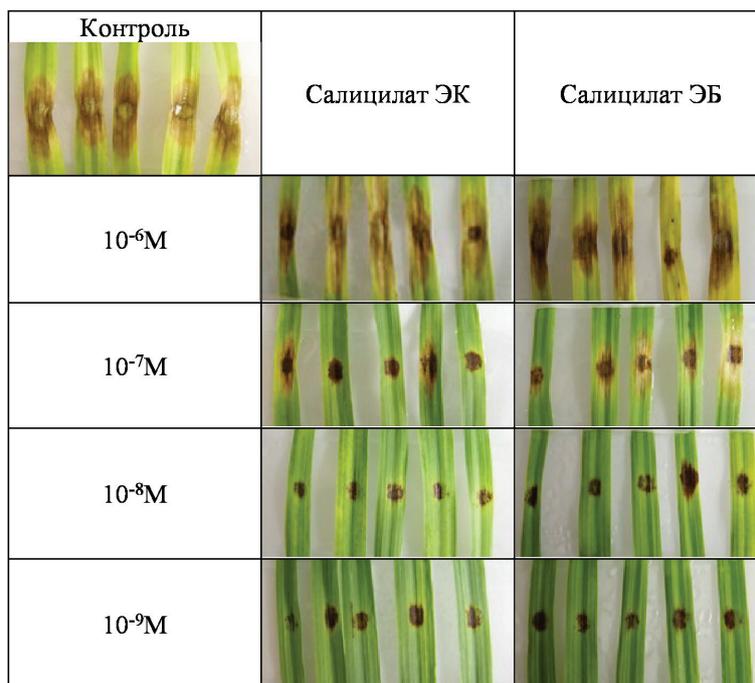


Рис. 1. Влияние конъюгированных брассиностероидных гормонов на развитие гриба *H. teres* на отрезках листьев ячменя
 Fig. 1. Influence of conjugate brassinosteroid hormones on fungus *H. teres* development on barley leaf cuts

признакам не всегда дает дифференцированное и достаточно выраженное значение (что мы и наблюдали в настоящих опытах). Это может быть связано, прежде всего, с полным отсутствием внешних признаков поражения болезнью в годы, когда проходят испытания. Поэтому мы обратились к исследованию биохимических признаков инфекции, которые могут свидетельствовать о поражении растений болезнью. Накопление пигментов в инфицированных растениях является, в частности, косвенным показателем адаптации растений, свидетельствуя о стимулировании обмена веществ в неблагоприятную для жизнедеятельности возбудителей сторону [13]. Увеличение выхода таких веществ из листьев говорит об интенсификации обмена веществ (здоровые растения) или сильном повреждении тканей (инфицированные растения). Снижение выхода водорастворимых веществ из листьев в пораженных растениях показывает, что защитное действие соединений успешно реализуется. В полевом мелкоделяночном опыте выявлено, что в агроценозе ярового ячменя применение салицилатов брассиностероидов оказывало стимулирующее действие на формирование защитных физиолого-биохимических реакций растения, несколько различаясь по вариантам. Содержание пигментов при применении всех соединений возрастало сразу после обработки, сохранялось высоким в фазе созревания и снижалось к концу вегетации в фазе молочной спелости только при применении салицилата 24-эпикастастерона в изученных дозах (10⁻⁶ М и 10⁻⁸ М), а 6-дезоксо-24-эпикастастерона – только в малой дозе (10⁻⁸ М).

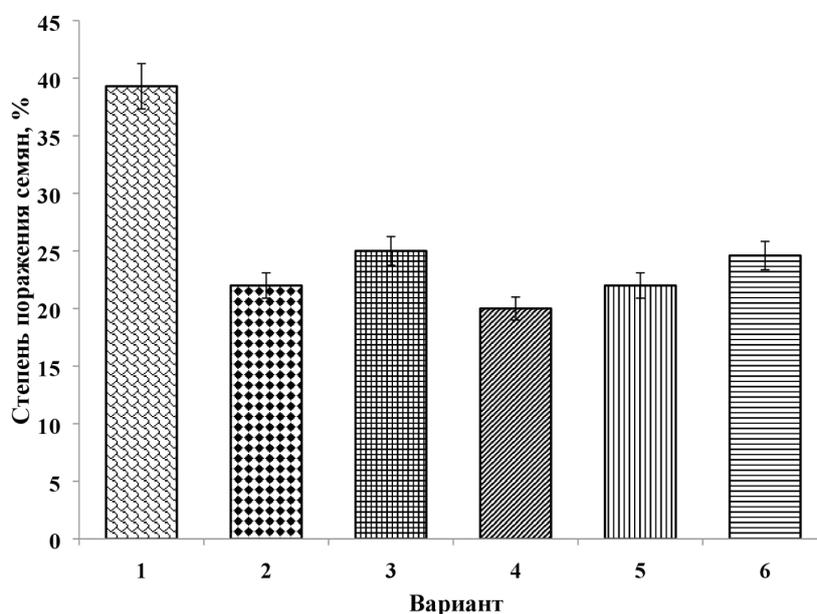
Накопление продуктов перекисного окисления (ТБК-продукты) в тканях растения свидетельствует о развивающемся патологическом процессе [14]. Ингибирование образования ТБК-продуктов, наоборот, говорит о реализации адаптационно-защитного потенциала растения. Изучение уровня малонового диальдегида (МДА) в листьях практически во всех вариантах с использованием салицилатов БС показало, что он ниже контрольных показателей вплоть до фазы молочной спелости, кроме варианта с использованием салицилата 6-дезоксо-24-эпибрассинолида в малой дозе (табл. 2, рис. 2).

Интересно, что выход водорастворимых веществ сразу после обработки снижился довольно сильно, а к концу вегетации практически во всех вариантах возрастал, особенно значительно в варианте с применением салицилата 24-эпибрассинолида в дозе 10⁻⁶ М. Вероятно, происходило это за счет сохраняющегося под воздействием этого соединения активного обмена веществ. Во всех остальных вариантах процессы были менее выражены. Полученные результаты подтверж-

Т а б л и ц а 2. Содержание ТБК-продуктов в листьях ярового ячменя под влиянием салицилатов brassinosterоидов

Table 2. The lipid peroxidation products content in spring barley leaves under the influence of brassinosteroid salicylates

Вариант Variant	Колошение Earing		Начало созревания Start of ripening		Молочная спелость Milky ripeness	
	МДА, мкМ/г сырой массы	% к контролю	МДА, мкМ/г сырой массы	% к контролю	МДА, мкМ/г сырой массы	% к контролю
Контроль	16,6 ± 0,17	100	36,6 ± 0,25	100	32,99 ± 0,04	100
Салицилат ЭБ (10 ⁻⁶ М)	16,6 ± 0,15	100	28,7 ± 0,16	78	32,62 ± 0,07	99
Салицилат ЭБ (10 ⁻⁸ М)	15,1 ± 0,16	91	32,2 ± 0,17	88	38,45 ± 0,06	117
Салицилат ЭК (10 ⁻⁶ М)	16,5 ± 0,18	99	27,6 ± 0,15	75	31,81 ± 0,03	96
Салицилат ЭК (10 ⁻⁸ М)	16,4 ± 0,16	99	28,9 ± 0,18	79	31,83 ± 0,05	96
Салицилат ДОЭК (10 ⁻⁶ М)	12,0 ± 0,17	72	24,9 ± 0,09	68	25,23 ± 0,05	76
Салицилат ДОЭК (10 ⁻⁸ М)	20,2 ± 0,18	121	40,7 ± 0,09	111	38,49 ± 0,06	117

Рис. 2. Влияние brassinosterоидных соединений на степень поражения семян ярового ячменя фитопатогенными грибами в первом поколении потомства: 1 – контроль; 2 – ЭБ, 10⁻⁶М; 3 – ЭБ + салициловая кислота, 10⁻⁶М; 4 – салицилат ЭБ, 10⁻⁶М; 5 – салицилат 6-дезоксо-ЭК, 10⁻⁶М; 6 – салицилат ЭК, 10⁻⁶МFig. 2. Influence of brassinosteroid compounds on degree of damage of spring barley seeds by pathogenic fungi in first descendent generation: 1 – control; 2 – EB, 10⁻⁶M; 3 – EB + salicylic acid, 10⁻⁶M; 4 – EB salicylate, 10⁻⁶M; 5 – 6-deoxo-EC salicylate, 10⁻⁶M; 6 – EC salicylate, 10⁻⁶M

дают данные о том, что применение салицилатов brassinosterоидов зависит как от дозы, способа и сроков обработки, так и от чувствительности испытуемого объекта, его готовности воспринимать экзогенное действие. По результатам физиолого-биохимических исследований лучшие результаты показало применение салицилата 24-эпибрасинолида в концентрации 10⁻⁶ М. Содержание пигментов во флаговом листе было выше контрольного почти на 40 %, выход водорастворимых веществ увеличивался вдвое при неизменном содержании продуктов перекисного окисления липидов. Стимулирующее действие на формирование адаптационных физиолого-биохимических реакций растений оказал также салицилат 6-дезоксо-24-эпикастастерона в концентрации 10⁻⁶ М.

Кажущееся противоречие в эффективных концентрациях изученных соединений в лабораторных и полевых опытах можно, вероятно, объяснить тем, что лабораторные опыты проводились на отсеченных листьях в течение 5 суток, при этом все вещество попадает в ткань растения до заражения грибом. В полевых условиях растения опрыскивались в процессе вегетации, и ве-

щество, распределяясь по всему растению, попадало в ткани листьев в меньшем количестве, при этом определялись параметры, характеризующие защитные свойства растения, которое не подвергнуто инфекции. Кроме того, физиолого-биохимические показатели определялись в течение всей вегетации растений, вплоть до созревания. Возможно, малые концентрации конъюгатов фитогормональных стероидов в полевых условиях оказались недостаточными для эффективного воздействия в течение длительного периода.

При биологическом анализе семян растений, выращенных в полевых условиях, выявлено, что эти семена в значительной степени были инфицированы *Penicillium* и другими сапротрофами. Анализ семян обработанных растений показал улучшение их фитосанитарного состояния в первом поколении потомства. Установлено, что накопление патогенов в семенах снижается на 10–12 % (рис. 2). В большей степени пораженность семян уменьшалась в вариантах с применением 24-эпибрассинолида и его конъюгата с салициловой кислотой. Таким образом показано последствие конъюгатов брассиностероидов с салициловой кислотой на качество семян обработанных растений.

Заключение. Определение антибиотической активности стероидных гормонов растений и их конъюгатов с салициловой кислотой в лабораторных условиях на модельной фитопатосистеме фитопатогенного гриба *Helminthosporium teres* Sacc. (возбудитель сетчатой пятнистости ячменя) показало, что салицилаты 24-эпибрассинолида, 24-эпикастестерона и впервые синтезированный салицилат 6-дезоксо-24-эпикастестерона улучшают посевные качества семян ярового ячменя и действуют как индукторы иммунитета растений под действием биотического стресса. Изученные конъюгаты в концентрациях 10^{-8} М и 10^{-9} М практически полностью ингибировали развитие инфекции.

В мелкоделяночных опытах показано, что применение салицилатов путем опрыскивания растений в фазу выхода в трубку оказывает стимулирующее действие на формирование защитных физиолого-биохимических реакций растений. Наиболее активное защитное действие при этом отмечено для салицилата 24-эпибрассинолида. Анализ семенной инфекции показал, что пораженность патогенами семян обработанных растений уменьшалась. В большей степени эффект наблюдался в вариантах с применением 24-эпибрассинолида и его салицилата.

Список использованных источников

1. Khripach, V. Twenty Years of Brassinosteroids: Steroidal Plant Hormones Warrant Better Crops for the XXI Century / V. A. Khripach, V. Zhabinskii, A. de Groot // *Ann. Bot.* – 2000. – Vol. 86, N 3. – P. 441–447. <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1227>
2. Bajguz, A. Effects of brassinosteroids on the plant responses to environmental stresses / A. Bajguz, S. Hayat // *Plant Physiol. Biochem.* – 2009. – Vol. 47, N 1. – P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.10.002>
3. Divi, U. K. Brassinosteroid-mediated stress tolerance in Arabidopsis shows interactions with abscisic acid, ethylene and salicylic acid pathways / U. K. Divi, T. Rahman, P. Krishna // *BMC Plant Biology.* – 2010. – Vol. 10, N 1. – P. 151–164. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-10-151>
4. 24-Epibrassinolide; an active brassinolide and its role in salt stress tolerance in plants: A review / M. Tanveer [et al.] // *Plant Physiol. Biochem.* – 2018. – Vol. 130. – P. 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.06.035>
5. Синтез и стресс-протекторное действие на растения конъюгатов брассиностероидов с салициловой кислотой / Р. П. Литвиновская [и др.] // *Химия природн. соед.* – 2016. – № 3. – С. 394–398.
6. Индолил-3-ацетоксипроизводные брассиностероидов: синтез и рострегулирующая активность / Р. П. Литвиновская [и др.] // *Химия природн. соед.* – 2013. – Т. 49, № 3. – С. 408–414.
7. CAN-Mediated Oxidations for the Synthesis of Xanthenes and Related Products / M. M. Johnson [et al.] // *J. Org. Chem.* – 2010. – Vol. 75, N 24. – P. 8701–8704. <https://doi.org/10.1021/jo101873v>
8. Коновалова, Г. С. Сравнительная характеристика популяций возбудителя ринхоспориоза ячменя из России и Узбекистана / Г. С. Коновалова // *Фитосанитарное оздоровление экосистем: материалы второго Всероссийского съезда по защите растений: в 2 т.* – СПб., 2005. – Т. 1. – С. 484–486.
9. Гавриленко, В. Ф. Большой практикум по физиологии растений / В. Ф. Гавриленко, М. Е. Ладыгина, Л. М. Хандобина. – М., 1975. – С. 283–285.
10. Методы оценки устойчивости растений к неблагоприятным условиям среды / под ред. Т. В. Олейникова [и др.] – Л., 1976. – С. 33–43.
11. Copper-induced Damage to the Permeability Barrier in Roots of *Silene cucubalus* / C. H. R. de Vos [et al.] // *J. Plant Physiol.* – 1989. – Vol. 135, N 2. – P. 164–169. [https://doi.org/10.1016/s0176-1617\(89\)80171-3](https://doi.org/10.1016/s0176-1617(89)80171-3)
12. Тютереv, С. Л. Научные основы индуцированной болезнестойчивости растений / С. Л. Тютереv. – СПб., 2002. – 328 с.

13. Воронков, Л. А. Фотосинтетический аппарат растений при патогенезе / Л. А. Воронков, И. А. Перова // Сельскохозяйственная биология. – 1978. – Т. 13. – С. 683–693.
14. Недведь, Е. Л. Состояние антиоксидантных систем при патогенезе злаковых культур. – Минск, 2010. – 21 с.

References

1. Khripach V., Zhabinskii V., de Groot A. Twenty Years of Brassinosteroids: Steroidal Plant Hormones Warrant Better Crops for the XXI Century. *Annals of Botany*, 2000, vol. 86, no. 3, pp. 441–447. <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1227>
2. Bajguz A., Hayat S. Effects of brassinosteroids on the plant responses to environmental stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2009, vol. 47, no. 1, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.10.002>
3. Divi U. K., Rahman T., Krishna P. Brassinosteroid-mediated stress tolerance in Arabidopsis shows interactions with abscisic acid, ethylene and salicylic acid pathways. *BMC Plant Biology*, 2010, vol. 10, no. 1, pp. 151–164. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-10-151>
4. Tanveer M., Shahzad B., Sharma A., Biju S., Bhardwaj R. 24-Epibrassinolide; an active brassinolide and its role in salt stress tolerance in plants: A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, vol. 130, pp. 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.06.035>
5. Litvinovskaya R. P., Vayner A. A., Zhylitskaya H. A., Kolupaev Y. E., Savachka A. P., Khripach V. A. Synthesis and stress-protective action on plants of brassinosteroid conjugates with salicylic acid. *Chemistry of Natural Compounds*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 452–457. <https://doi.org/10.1007/s10600-016-1671-y>
6. Litvinovskaya R. P., Minin P. S., Raiman M. E., Zhilitskaya G. A., Kurtikova A. L., Kozharnovich K. G., Derevyanchuk M. V., Kravets V. S., Khripach V. A. Indolyl-3-acetoxy derivatives of brassinosteroids: synthesis and growth-regulating activity. *Chemistry of Natural Compounds*, 2013, vol. 49, no. 3, pp. 478–485. <https://doi.org/10.1007/s10600-013-0643-8>
7. Johnson M. M., Naidoo J. M., Fernandes M. A., Mmutlane E. M., van Otterlo W. A. L., de Koning C. B. CAN-Mediated Oxidations for the Synthesis of Xanthenes and Related Products. *Journal of Organic Chemistry*, 2010, vol. 75, no. 24, pp. 8701–8704. <https://doi.org/10.1021/jo101873v>
8. Konovalova G. S. Comparative characteristics of populations of the causative agent of barley rhynchosporiosis from Russia and Uzbekistan. *Fitosanitarnoe ozdorozhenie ekosistem: materialy vtorogo Vserossiiskogo s'ezda po zashchite rastenii: v 2 t. [Phytosanitary improvement of ecosystems: materials of the second All-Russian Congress on Plant Protection: in 2 vol.]*. St. Petersburg, 2005, vol. 1, pp. 484–486 (in Russian).
9. Gavrilenko V. F., Ladygina M. E., Handobina L. M. *Great workshop on plant physiology*. Moscow, 1975, pp. 283–285 (in Russian).
10. Oleinikova T. V., Udovenko G. V., Barashkova E. A., Vinogradova V. V., Volkova A. M., Kozhushko N. N., Sinel'nikova V. N. (eds). Methods for assessing plant resistance to adverse environmental conditions. Leningrad, 1976, pp. 33–43 (in Russian).
11. de Vos C. H. R., Schat H., Vooijs R., Ernst W. H. O. Copper-induced Damage to the Permeability Barrier in Roots of *Silene cucubalus*. *Journal of Plant Physiology*, 1989, vol. 135, no. 2, pp. 164–169. [https://doi.org/10.1016/s0176-1617\(89\)80171-3](https://doi.org/10.1016/s0176-1617(89)80171-3)
12. Tjuterev S. L. *Scientific foundations of induced disease resistance of plants*. St. Petersburg, 2002. 328 p. (in Russian).
13. Voronkov L. A., Perova I. A. Plant photosynthetic apparatus during pathogenesis. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya = Agricultural Biology*, 1978, vol. 13, pp. 683–693 (in Russian).
14. Nedved E. L. *The state of antioxidant systems in the pathogenesis of cereal crops*. Minsk, 2010. 21 p. (in Russian).

Информация об авторах

Манжелесова Нелли Евгеньевна – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: patphysio@mail.ru.

Литвиновская Раиса Павловна – д-р хим. наук, гл. науч. сотрудник. Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Купревича, 5/2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: litvin@iboch.by.

Полянская Светлана Николаевна – канд. биол. наук, науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: snpoljan@mail.ru.

Корытько Лариса Александровна – науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: patphysio@mail.ru.

Савочка Олег Петрович – науч. сотрудник. Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Купревича, 5/2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: oleg.brsv@iboch.by.

Information about the authors

Manzhalesava Neli Yevgenievna – Ph. D. (Biology), Leading researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: patphysio@mail.ru.

Litvinovskaya Raisa Pavlovna – 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: litvin@iboch.by.

Poljanskaja Svetlana Nikolaevna – Ph. D. (Biology). Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: snpoljan@mail.ru.

Karytsko Larisa Aleksandrovna – Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: patphysio@mail.ru.

Savachka Aleh Petrovich – Researcher. Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (5/2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: oleg.brsv@iboch.by.

БИОЛОГИЯ
BIOLOGYУДК 581.174.1:575.111:582.632.1
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-312-316>Поступило в редакцию 12.09.2018
Received 12.09.2018**О. Ю. Баранов, П. С. Кирьянов, С. В. Пантелеев, Л. В. Можаровская,
А. В. Падутов, О. А. Разумова, член-корреспондент В. Е. Падутов***Институт леса Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь***АНАЛИЗ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ХЛОРОПЛАСТНОГО
ГЕНОМА КАРЕЛЬСКОЙ БЕРЕЗЫ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ
ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО СЕКВЕНИРОВАНИЯ**

Аннотация. Проведено секвенирование и аннотация хлоропластного генома карельской березы. Выявлен высокий уровень сходства структурно-функциональной организации хлДНК среди видов семейства Betulaceae. Разработан набор праймеров для оценки уровня экспрессии EST-маркеров хлДНК карельской березы методом ПЦР-РВ.

Ключевые слова: хлДНК, высокопроизводительное секвенирование, карельская береза

Для цитирования: Анализ структурно-функциональной организации хлоропластного генома карельской березы на основании данных высокопроизводительного секвенирования / О. Ю. Баранов [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 312–316. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-312-316>

**Oleg Yu. Baranov, Pavel S. Kiryanov, Stanislav V. Pantelev, Ludmila V. Mozharovskaya, Alexandr V. Padutov,
Olga A. Razumova, Corresponding Member Vladimir E. Padutov***Forest Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus***ANALYSIS OF STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ORGANIZATION OF THE CURLY BIRCH
CHLOROPLAST GENOME BASED ON THE NEXT-GENERATION SEQUENCING DATA**

Abstract. The sequencing and annotation of the curly birch chloroplast genome were carried out. A high level of similarity of the structural and functional organization of cpDNA among the species of the Betulaceae family was revealed. A set of primers was developed to assess the level of expression of EST markers of the curly birch cpDNA by the real time PCR method.

Keywords: cpDNA, next-generation sequencing, curly birch

For citation: Baranov O. Yu., Kiryanov P. S., Pantelev S. V., Mozharovskaya L. V., Padutov A. V., Razumova O. A., Padutov V. E. Analysis of structural and functional organization of the curly birch chloroplast genome based on the next-generation sequencing data. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 312–316 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-312-316>

Введение. Одним из путей интенсификации развития лесной отрасли является расширение видового спектра выращиваемых древесных пород, характеризующихся наличием значительного числа хозяйственно ценных признаков и свойств. С одной стороны, это обусловлено потребностью увеличения ассортимента лесоматериалов для деревоперерабатывающих предприятий, с другой – возрастающей необходимостью увеличения биологической продуктивности и устойчивости лесных насаждений, сохранения их средообразующей функции в условиях изменяющегося климата. В настоящее время данный подход реализуется как за счет плантационного выращивания интродуцированных видов древесных растений, так и за счет постадийного наращивания ресурсов редких представителей местной флоры.

Одной из хозяйственно ценных форм древесных растений является карельская береза (*Betula pendula* Roth. var. *carelica* Mercl.). Характерной особенностью данной породы является

высокодекоративная текстура древесины, получившая мировую известность, применяемая для отделки мебели и внутренних помещений зданий, производства изделий декора и сувениров. Структура рисунка напоминает собой мрамор с переливами широкого спектра оттенков и темными включениями разнообразной формы.

Отличительной особенностью внешнего вида узорчатых форм берез является, как правило, наличие на стволах утолщений в виде мелкой бугорчатости, шаровидных наплывов или отдельных вздутий в местах отхода толстых скелетных ветвей. Другая специфика карельской березы связана с большим разнообразием габитуальных форм – от кустарников до полнодревесных растений, что сопоставимо с межвидовой изменчивостью в пределах рода *Betula*. По запасам естественных ресурсов карельской березы в настоящее время Республика Беларусь занимает одно из лидирующих положений – общая площадь лесных насаждений, занимаемых *B. pendula* var. *carelica*, составляет порядка 700 га. Одним из вопросов, связанных с интенсификацией воспроизводства высокодекоративных по текстуре древесины форм карельской березы, является установление механизмов формирования указанных морфолого-анатомических особенностей. Основываясь на литературных материалах можно выделить ряд основных гипотез происхождения карельской березы, учитывающих экологическую, филогенетическую, биохимическую, физиологическую, фитопатологическую и наследственную специфику данной породы, однако ни одна из предложенных концепций досконально не объясняет возникновение и воспроизведение структурно-функциональных аномалий, а также не находит полного экспериментального подтверждения, что, по всей видимости, указывает на многофакторный характер формирования признака узорчатости древесины [1].

В настоящее время для изучения наследственных особенностей карельской березы наиболее информативным является геномный подход, позволяющий производить анализ структурно-функциональных характеристик генов в их совокупности. Одним из потенциальных объектов исследования *B. pendula* var. *carelica* может выступать ее пласто́м (хпДНК), что обусловлено отмечаемой физиологической особенностью – формирование узорчатости древесины происходит только в условиях высокой освещенности. При этом основным предметом исследования будет выступать не генетический полиморфизм хлоропластных локусов, поскольку в гаплотипически единообразном потомстве (хпДНК у покрытосеменных растений передается, как правило, по материнской линии) наблюдается расщепление по признаку узорчатости, а структурно-функциональные аспекты связаны с особенностями организации пласто́ма, регуляции и экспрессии его генов [2]. Проведенный анализ международных генетических баз данных показал, что к настоящему времени информация по структуре хпДНК карельской березы представлена лишь фрагментарно и не отражает полного спектра геномных и геногеографических характеристик данной породы.

Исходя из всего вышесказанного, целью данного исследования явилось проведение секвенирования хпДНК карельской березы, установление структурно-функциональной организации хлоропластного генома, сравнительный анализ с другими видами древесных растений и разработка набора ДНК-маркеров для оценки функциональной активности локусов хпДНК у узорчатых и безузорчатых форм берез.

Материалы и методы исследования. В качестве экспериментального материала были использованы фрагменты вегетативных органов двух узорчатых клонов карельской березы (КС06 и Ia) из коллекции культур *in vitro* Института леса НАН Беларуси. Выделение хлоропластов и получение препаратов нуклеиновых кислот, насыщенных хпДНК, производились на основании общепринятой методики [3]. Высокопроизводительное секвенирование хпДНК осуществлялось с использованием Ion Torrent™ PGM System (Thermo Scientific, США), согласно протоколу анализа (200 п. н.), рекомендуемому компанией-производителем. Обработку результатов секвенирования, включая сборку и аннотацию последовательностей, выполняли с помощью программного пакета Lasergene v.11 (DNASTAR, Израиль).

Результаты и их обсуждение. В результате *de novo* сборки первичных данных высокопроизводительного секвенирования хпДНК клонов карельской березы получена консенсусная последовательность размером 161123 нуклеотидов (задепонирована в GeneBank NCBI под но-

мером MG966529) [4]. Выявленные различия между клонами были обусловлены однонуклеотидным полиморфизмом (позиция 7787), связанным с дупликацией в повторяющейся последовательности ($n = 9$) мононуклеотидного мотива А-типа.

Изучение частоты встречаемости нуклеотидных оснований в хпДНК карельской березы показало, что доминирующими видами нуклеотидов являются А и Т, суммарно составляя 64,0 % от всех типов оснований (31,5 и 32,5 % соответственно). На долю нуклеотидов G и C приходится 17,7 и 18,3 %. Распределение оснований в пределах коротких (≤ 10 мономеров) участков нуклеотидной последовательности было, как правило, произвольным – частота встречаемости большинства типов олигонуклеотидных сочетаний соответствовала ожидаемым вероятностным показателям их формирования, что указывает на отсутствие выраженного отбора последовательностей определенной структуры. В то же время в отдельных случаях наблюдались статистически достоверные отклонения от расчетных параметров. Например, в случае гомодимеров CC и GG – частота их встречаемости (4,5 и 4,1 %) была выше ожидаемых значений (3,3 и 3,1 %), при этом комбинации CG (3,0 %) и GC (2,8 %) соответствовали прогнозируемой величине – 3,2 %.

Распределение нуклеотидных оснований в молекуле хпДНК карельской березы на макроуровне носило выраженный кластерный характер и включало два АТ-насыщенных участка размером 22 и 120 тыс. п. н. (данные области содержат тРНК- и белок-кодирующие последовательности), разделенных двумя более короткими (10 тыс. п. н.) GC-насыщенными регионами (относятся к инвертированным повторам хпДНК и содержат в основном гены рибосомных РНК 4,5S, 5S, 16S и 23S).

Проведенный сравнительный анализ нуклеотидной последовательности рибосомальных генов хпДНК карельской березы с депонентами (не относящимися к пластомным данным) базы данных GeneBank NCBI выявил наибольшую степень сходства *B. pendula* var. *carelica* с представителями отдела Цианобактерий, для которых также является характерным повышенное содержание GC-оснований по сравнению с другими видами прокариотических организмов.

В ходе проведенной аннотации хлоропластного генома было выявлено 130 кодирующих локусов, представляющих различные функциональные системы (таблица).

Следует отметить, что ряд локусов хлоропластного генома был представлен в двух копиях. Как правило, это было связано с локализацией данных генов (*trnN-GUU*, *trnR-ACG*, *trnL-CAA*, *trnI-CAU*, *trnA-UGC*, *trnI-GAU*, 4.5S ribosomal RNA, 5S ribosomal RNA, 16 S ribosomal RNA, 23S ribosomal RNA, *ycf1*, *ycf2*, *rpl23*, *rps7*, *rpl2*) в дублированном регионе молекулы хпДНК – инвертированных повторам, разделяющих с обеих сторон две монокопийные области – малую и большую единичные копии.

Детальный анализ перечня и последовательности расположения локусов показал, что структура хлоропластного генома карельской березы в незначительной степени отличается от пластов представителей семейства Betulaceae (роды *Betula*, *Alnus*, *Carpinus*, *Corylus*), находящихся в базе данных GeneBank NCBI. В ходе сопоставления нуклеотидных последовательностей как отдельных локусов, так и в целом молекулы хпДНК установлено, что наименьшие генетические различия были выявлены между карельской березой и березой повислой ($D_{\text{усред}} = 0,0004$), что соответствует их текущему таксономическому положению – *B. pendula* var. *carelica* и *B. pendula* соответственно.

Следует отметить, что выявленные молекулярно-генетические отличия были локализованы только в некодирующих участках геномов. В то же время диагностированные различия между пластами карельской березы и других видов рода *Betula* были связаны как с некодирующими участками генома, так и с кодирующими (в частности, гены *ndhF*, *ycf1*, *matK*, *atpI*). При этом размеры различающихся участков в некодируемых областях пластома могли достигать до 40 нуклеотидных оснований.

Также в ходе проведенных исследований на основании полученных данных секвенирования и аннотации хлоропластного генома разработан набор праймеров [5] для оценки уровня экспрессии генов, локализованных в хпДНК карельской березы, с целью оценки их роли в формировании узорчатой текстуры древесины.

Функциональная принадлежность аннотированных локусов хлоропластного генома карельской березы

Functional belonging of the curly birch chloroplast genome

Кодируемый продукт Coded product	Локус Locus	Функциональная принадлежность Functional belonging
Субъединицы РНК полимеразы	rpoA, rpoC2, rpoC1, rpoB	Транскрипция генов
Рибосомальные РНК	4,5S rDNA, 5S rDNA, 16 S rDNA, 23S rDNA	Биосинтез белка
Транспортные РНК	trnA, trnH, trnK, trnQ, trnS, trnG, trnR, trnC, trnD, trnY, trnE, trnT, trnM, trnS, trnL, trnF, trnV, trnW, trnP, trnI, trnR, trnN	Биосинтез белка
Структурные белки большой субъединицы рибосомы	rpl2, rpl33, rpl20, rpl36, rpl14, rpl16, rpl22, rpl23, rpl32	Биосинтез белка
Структурные белки малой субъединицы рибосомы	rps2, rps16, rps14, rps4, rps18, rps12, rps11, rps8, rps3, rps19, rps 7, rps15	Биосинтез белка
Структурные белки фотосистемы 1	psaB, psaA, psaI, psaJ, psaC	Световая стадия фотосинтеза
Структурные белки фотосистемы 2	psbA, psbK, psbI, psbM, psbD, psbC, psbZ, psbJ, psbL, psbF, psbE, pabB, psbT, psbN, psbH	Световая стадия фотосинтеза
Цитохромы	petN, petA, petL, petG, petB, petD	Световая стадия фотосинтеза
Субъединицы АТФ синтазы	atpA, atpF, atpH, atpI, atpE, atpB	Биосинтез АТФ
Большая субъединица рибулозо-1,5-дифосфат карбоксилазы	rbcl	Темновая стадия фотосинтеза
Геминкорпорирующий белок	ccsA	Биогенез цитохрома C
Фактор инициации трансляции	infA	Биосинтез белка
Субъединицы НАДФ дегидрогеназы	ndhJ, ndhK, ndhC, ndhB, ndhF, ndhD, ndhE, ndhG, ndhI, ndhA, ndhH	Световая стадия фотосинтеза
Матураза	matK	Сплайсинг мРНК
Структурный белок мембраны хлоропласта	cemA	Мембранный транспорт
Протеиназа	clpP	Катоболизм белка
Ацетил-СоА карбоксилаза	accD	Биосинтез жирных кислот
Открытые рамки считывания	ycf1, ycf2, ycf3, ycf4	Не установлена

Заключение. Структурно-функциональная организация хпДНК карельской березы имела высокую степень сходства с березой повислой, а также с изученными видами родов *Betula*, *Alnus*, *Carpinus*, *Corylus*. Диагностированные межвидовые отличия нуклеотидной последовательности в кодирующих участках пластома были связаны, как правило, с нуклеотидными заменами, в некодирующих – с заменами, инсерциями и делециями. Данные молекулярно-таксономического анализа карельской березы соответствуют ее существующему систематическому положению – *Betula pendula* var. *carelica*.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Б17-63).

Acknowledgements. The work was sponsored by the Belarusian Republication Foundation for Fundamental Research (Project No. Б17-63).

Список использованных источников

1. Ветчинникова, Л. В. Происхождение карельской березы: эколого-генетическая гипотеза / Л. В. Ветчинникова, А. Ф. Титов // Экологическая генетика. – 2016. – Т. 14, № 2. – С. 3–18. <https://doi.org/10.17816/ecogen1423-18>
2. Bajaj, Y. S. Plant Protoplasts and Genetic Engineering II / Y. S. Bajaj. – Berlin, 1989. – 499 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-74454-9>
3. Methods for obtaining and analyzing whole chloroplast genome sequences / R. K. Jansen [et al.] // Methods in enzymology. – 2005. – Vol. 395. – P. 348–384. [https://doi.org/10.1016/s0076-6879\(05\)95020-9](https://doi.org/10.1016/s0076-6879(05)95020-9)
4. National center for biotechnology information [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov>. – Date of access: 17.07.2018.
5. Перечень праймеров для амплификации методом ПЦР локусов хпДНК [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mega.nz/#!WoUXSA7L!BQ3BtGtZAI7jnQsEX0Vh7VaXN Hju4LJPJD9oWRMU2-4>. – Дата доступа: 13.08.2018.

References

1. Vetchinnikova L. V., Titov A. F. Genesis of the Karelian Birch. An Ecogenetic hypothesis. *Ecological genetics*, 2016, vol. 14, no. 2, pp. 3–18 (in Russian). <https://doi.org/10.17816/ecogen1423-18>

2. Bajaj Y. S. *Plant Protoplasts and Genetic Engineering II*. Berlin, 1989. 499 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-74454-9>

3. Jansen R. K., Raubeson L. A., Boore J. L., de Pamphilis C. W., Chumley T. W., Haberle R. C., Wyman S. K., Alverson A. J., Sallie R. P., Herman J., Matthew H., Jennifer F., Kuehl V., McNeal J. R., Leebens-Mack J., Cui L. Methods for obtaining and analyzing whole chloroplast genome sequences. *Methods in enzymology*, 2005, vol. 395, pp. 348–384. [https://doi.org/10.1016/s0076-6879\(05\)95020-9](https://doi.org/10.1016/s0076-6879(05)95020-9)

4. National center for biotechnology information. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov> (accessed 17 July 2018).

5. *The list of PCR primers for amplification of the loci of cpDNA*. Available at: <https://mega.nz/#!WoUXSA7L!BQ3BtG-tZAI7jnQsEX0Vh7VaXN HjU4LJPJD9oWRMU2-4> (accessed 13 August 2018).

Информация об авторах

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

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

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

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

Падутов Александр Владимирович – мл. науч. сотрудник. Институт леса НАН Беларуси (ул. Пролетарская, 71, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: apadutov@yandex.by.

Разумова Ольга Александровна – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Институт леса НАН Беларуси (ул. Пролетарская, 71, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: o-kovalevich@mail.ru.

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

Information about the authors

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

Kiryanov Pavel Sergeevich – Junior researcher. Forest Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: PKirjanov@yandex.ru.

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

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

Padutov Alexandr Vladimirovich – Junior researcher. Forest Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: apadutov@yandex.by.

Razumova Olga Alexandrovna – Ph. D. (Biology), Senior researcher. Forest Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: o-kovalevich@mail.ru.

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

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

УДК 577.35: 632.4: 633.16
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-317-324>

Поступило в редакцию 15.10.2018
Received 15.10.2018

Г. Е. Савченко, Т. С. Бачище, член-корреспондент Л. Ф. Кабашникова

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

ВЛИЯНИЕ ЭКЗОГЕННОГО β -1,3-ГЛЮКАНА НА ВЕЛИЧИНУ pH АПОПЛАСТА И ЦИТОПЛАЗМЫ В ТКАНЯХ ЗДОРОВЫХ И ИНФИЦИРОВАННЫХ *BIPOLARIS SOROKINIANA* (SACC.) SHOEM. ПРОРОСТКАХ ЯЧМЕНЯ (*HORDEUM VULGARE* L.)

Аннотация. С помощью pH-чувствительных зондов FITC-декстрана и пиранина исследовали механизмы действия β -1,3-глюкана из эвглены (*Euglena gracilis*) на уровне изменений pH вне и внутри клетки в тканях листа 7-дневных проростков ячменя *in vivo*. Установлено, что инкубация листьев ячменя, отделенных от корней, на растворе β -1,3-глюкана (0,01 %) в течение 40 мин не вызывала закисления цитоплазмы как типичного неспецифического ответа растения на раневой стресс. Инокуляция интактных проростков спорами гриба *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem. приводила к защелачиванию апопласта на 1,7 единиц pH, а предобработка проростков β -1,3-глюканом за сутки до грибного заражения способствовала его закислению на 1,04 единиц по сравнению с инфицированным вариантом, что свидетельствует об усилении работы АТФаз, выкачивающих протоны из цитоплазмы в апопласт. Проведенные исследования способствуют подбору оптимальных концентраций β -1,3-глюкана для иммуномодулирующих смесей.

Ключевые слова: яровой ячмень, β -1,3-глюкан, pH апопласта, pH цитоплазмы, флуоресценция, FITC, пиранин, *Hordeum vulgare* L., *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem.

Для цитирования: Савченко, Г. Е. Влияние экзогенного β -1,3-глюкана на величину pH апопласта и цитоплазмы в тканях здоровых и инфицированных *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem. проростках ячменя (*Hordeum vulgare* L.) / Г. Е. Савченко, Т. С. Бачище, Л. Ф. Кабашникова // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 317–324. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-317-324>

Galina E. Savchenko, Tatsiana S. Bachyshcha, Corresponding Member Liudmila F. Kabashnikova

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

INFLUENCE OF EXOGENOUS β -1,3-GLUCANE ON THE pH LEVEL OF APOPLAST AND CYTOPLASM IN HEALTHY AND *BIPOLARIS SOROKINIANA* (SACC.) SHOEM. SEEDLINGS OF BARLEY (*HORDEUM VULGARE* L.)-INFECTED TISSUES

Abstract. Effects of β -1,3-glucan from euglena (*Euglena gracilis*) were studied *in vivo* by evaluating pH changes outside and inside the cell in the tissues of the 7-day leaves of barley seedlings with the use of pH-sensitive probes of FITC-dextran and pyranine. It was found that the incubation of barley leaves separated from the roots in the solution of β -1,3-glucan (0.01 %) for 40 min did not cause acidification of cytoplasm as a typical nonspecific plant response to wound stress. The inoculation of intact seedlings with *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem. spores resulted in alkalization of apoplast by 1.7 pH units, and pretreatment of seedlings with β -1,3-glucan a day before the fungal infection promoted its acidification (1.04 pH units) compared to the infected variant, indicating an increased performance of ATPase, which pumped protons from cytoplasm into apoplast. The conducted studies contribute to the selection of optimal concentrations of β -1,3-glucan for immunomodulatory mixtures.

Keywords: barley, β -1,3-glucane, pH of apoplast, pH of cytoplasm, fluorescence, FITC-dextran, pyranine, *Hordeum vulgare* L., *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem.

For citation: Savchenko G. E., Bachyshcha T. S., Kabashnikova L. F. Influence of the exogenous β -1,3-glucane on the pH level of apoplast and cytoplasm in healthy and *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem. seedlings of barley (*Hordeum vulgare* L.)-infected tissues. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 317–324 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-317-324>

Введение. Повышение иммунного статуса растений путем индукции природных защитных механизмов и разработка новых экологически безопасных препаратов на основе индукторов иммунитета тесно связаны с исследованием природы системного приобретенного защитного ответа [1] и механизмов устойчивости растений к патогенным микроорганизмам. На роль защитных средств такого рода претендуют эффективные иммуномодулирующие вещества полисахаридной природы – β -1,3/1,6-глюканы, широко используемые в медицинской практике. Установлено, что в результате избирательного связывания этих глюканов со специфическими рецепторами в клетках животных организмов активируется фагоцитарная функция,

начинают усиленно синтезироваться и высвобождаться вещества, являющиеся сигналом для других клеток иммунной системы [2]. В настоящее время известно, что и в растениях разных видов глюкозаны выполняют роль сигнальных молекул, обладающих элиситорными свойствами, и вызывают спектр защитных реакций при инфицировании [3–5], приводящих к повышению устойчивости и продуктивности. С другой стороны, показано, что сигнальные пути, лежащие в основе иммунного ответа, могут активироваться секретруемыми патогеном молекулами при их взаимодействии с растением-хозяином [6]. Тем не менее, механизмы действия экзогенных β -глюкозаны как на здоровое, так и на зараженное растение пока во многом остаются неясными, особенно на клеточном уровне реализации защитных реакций.

Использованный в нашей работе грибной патоген *Bipolaris sorociniana* (Sacc.) Shoem. (далее – *Bipolaris s.*) инфицирует растение злаков посредством прямого проникновения в эпидермис молодых листьев или через устьица [7], поэтому можно ожидать влияния инфицирования этим патогеном на уровне апопласта. С другой стороны, в самых общих чертах известно, что действующие на растения неблагоприятные факторы, включая биотический стресс, могут вызывать ряд неспецифических ответных реакций в клеточных мембранах, одной из которых является закисление цитоплазмы [1]. В связи с этим исследование изменений pH вне и внутри клетки может быть полезным как для выяснения особенностей взаимодействия конкретного патогена *Bipolaris s.* с проростками ячменя, так и для исследования индуцируемых глюкозанами защитных механизмов.

Следует отметить, что прижизненный мониторинг изменений pH – достаточно сложная в экспериментальном отношении задача. В настоящей работе с этой целью использованы pH-зависимые флуоресцентные зонды, с помощью которых исследованы разные по времени ответы растения на уровне изменений pH. Информативность быстрой реакции на мембранном уровне, отражающей сигнальную роль стрессора или иммуномодулятора при формировании механизмов защиты в растении, не вызывает сомнений. В то же время изменение pH при продолжительном действии стрессора (или как следствие его) может иметь значение для активности ферментов, локализованных во внутри- и межклеточных компартментах. Полученные результаты позволят приблизиться к раскрытию механизмов прайминга защитных реакций к грибным патогенам в растениях ярового ячменя под действием индуктора глюкозановой природы.

Материалы и методы исследования. Работу проводили с растениями ячменя сорта Магутны, выращенными на полихроматичном белом свете ($120 \text{ мкмоль квантов м}^{-2}\text{с}^{-1}$) при температуре $22 \text{ }^\circ\text{C}$. В одном типе экспериментов осуществляли мониторинг pH цитоплазмы в срезанных листьях 7-дневных проростков, помещенных в 0,01 %-ный водный раствор β -1,3-глюкана из эвглени (Sigma-Aldrich) на разное время. В другом – использовали интактные проростки, часть которых в 4-дневном возрасте опрыскивали из пульверизатора раствором глюкозана, а затем через сутки инокулировали спорами гриба *Bipolaris s.* Анализ состояния pH апопласта и цитоплазмы проводили в тканях листа проростков, достигших 7-дневного возраста.

Величину pH *in vivo* измеряли с помощью pH-чувствительных флуоресцентных зондов – FITC-декстрана (Sigma) и пиранина (Sigma). В обоих типах экспериментов зонды вводили в интактные проростки с транспирационным током через слегка подрезанные корни. FITC-декстран, не проникающий в цитоплазму из-за большого размера молекул [8], используется для оценки изменений pH только во внеклеточном пространстве. Поэтому проростки разных вариантов инкубировали в растворе этого зонда (1 мМ) не менее 1 ч и оставляли их в нем вплоть до начала флуоресцентных измерений. Пиранин, напротив, легко проникает из апопласта в клетку. Чтобы охарактеризовать состояние pH только в цитоплазме, зонд необходимо удалить из апопластного пространства. Для этого инкубированные в течение 1 ч на пиранине (1 мМ) проростки перенесли не менее чем на 1 ч на дистиллированную воду [8].

При использовании интенсивности флуоресценции для оценки pH *in vivo* всегда существует проблема, связанная с количеством зонда, поступившего в тот или иной компартмент клетки. Поэтому для более точного суждения об изменении pH предпочтителен способ, при котором используется нормированная флуоресценция, нивелирующая неизбежные концентрационные эффекты. Известно, что в области физиологически значимых изменений pH (от 5,0 до 7,0) молекула FITC существует как смесь нейтральной и анионной форм с довольно широким спектром

поглощения в области 450–470 нм [9]. Это позволило использовать для возбуждения флуоресценции FITC длину волны 465 нм, а в качестве внутреннего стандарта, повышающего точность определения изменений рН, – отношение интенсивности свечения двух пиков в спектре испускания зонда с максимумами при 520 ± 2 и 550 ± 2 нм. Ранее было показано, что величина отношения I_{520}/I_{550} не зависит от концентрации зонда [10], но реагирует на изменения рН, а в области их физиологически важных значений калибровочная кривая имеет достаточно хорошо выраженный линейный участок. На основании данных калибровочной зависимости для определения величины рН в апопластном пространстве пользовались уравнением $\text{pH} = (I_{520}/I_{550} + 0,66) / 0,34$ [11].

Способ определения рН цитоплазмы был основан на технике двойного возбуждения [12], при которой измеряли величину отношения интенсивности флуоресценции пиранина в максимуме испускания (520 нм) при двух длинах волн возбуждения (404 и 456 нм), соответствующих двум максимумам в спектре его поглощения [13]. Согласно полученной нами калибровочной зависимости, величина I_{404}/I_{456} линейно связана с рН в области физиологических значений последнего и может быть рассчитана по уравнению $\text{pH} = (96,3 - I_{404}/I_{456}) / 13,2$. Таким образом, непосредственным результатом измерений во всех экспериментах являлись нормированные величины флуоресценции соответствующего зонда, на основании которых рассчитывали значения рН.

Спектры флуоресценции регистрировали на спектрофлуориметре СОЛАР СМ 2203 (Беларусь), используя специальную приставку для твердых объектов, в которую помещали нагруженные соответствующим зондом отрезки листьев, зажатые между двумя покровными стеклами. Во всех вариантах анализировали одинаковые участки отрезков листа длиной 3 см за вычетом верхушки (1 см). Известно, что многие структурно-функциональные параметры варьируют вдоль листа злаков, поэтому морфологическая идентичность анализируемых тканей является непременным условием для проведения любых сравнительных исследований.

При статистической обработке данных использовали программу Statistica 10.0 (StatSoft), с помощью которой оценивали значения средней арифметической, ошибку средней величины (число биологических повторностей – от 3 до 5), t и P .

Результаты и их обсуждение. Динамика изменения рН-зависимого параметра флуоресценции пиранина (I_{404}/I_{456}) во внутриклеточном пространстве тканей листа при погружении его на разное время в раствор β -1,3-глюкана показана на рис. 1. В квадратных скобках приведены соответствующие значения рН, рассчитанные на основе калибровочной зависимости. Видно, что инкубация срезанных листьев на дистиллированной воде в течение 60 мин вызывала изменение рН цитоплазмы на 0,35 единицы в сторону закисления (от 6,69 до 6,34), что обычно связывают с раневым эффектом [1; 11].

Введение в лист β -1,3-глюкана способствовало поддержанию более высокого уровня рН и в первые 40 мин инкубации наблюдали увеличение величины рН по сравнению с контролем.

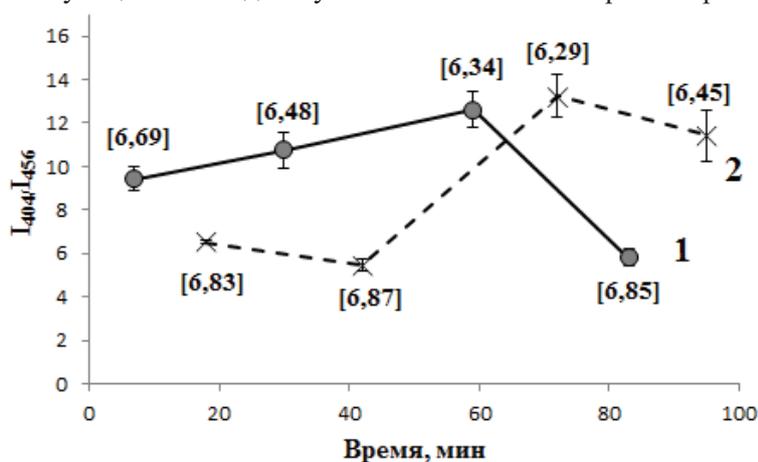


Рис. 1. Изменения рН-зависимого параметра флуоресценции пиранина (I_{404}/I_{456}) в срезанных листьях ячменя, инкубированных на воде (1) или растворе β -1,3-глюкана (2) из эвглены (0,01 %). В скобках показаны соответствующие значения рН

Fig. 1. Changes in the pH-dependent fluorescence parameter of pyranine (I_{404}/I_{456}) in cut barley leaves incubated on water (1) or on a solution of β -glucan (2) from Euglena (0.01 %). The respective pH values are shown in the square brackets

Таким образом, раневой эффект как неспецифическая ответная реакция на стресс, при которой частично ингибируется работа АТФаз, выкачивающих протоны из цитоплазмы, в присутствии глюкоана не обнаруживался в течение первых 40 мин. Затем значения рН в контрольном и опытном вариантах на некоторое время практически сблизились, после чего величина рН цитоплазмы в контроле увеличивалась до 6,85, а в глюкоановом варианте продолжала оставаться на уровне 6,29–6,45. В табл. 1 приведены результаты статистической обработки данных для исходного рН-зависимого флуоресцентного параметра I_{404}/I_{456} , позволяющие говорить о надежности различий минимальных и максимальных значений величины I_{404}/I_{456} в первые 40 мин инкубации на растворе глюкоана.

Т а б л и ц а 1. Результаты статистической обработки данных, характеризующих динамику изменения рН-зависимого параметра флуоресценции пиранина I_{404}/I_{456} в срезанных листьях ячменя, инкубированных на растворе β -1,3-глюкана из эвглены (0,01 %)

T a b l e 1. Statistical processing of data characterizing the dynamics of the pH-dependent fluorescence parameter of pyranine I_{404}/I_{456} in cut barley leaves incubated on water or on a solution of β -1,3-glucan from *Euglena* (0.01 %)

Вариант Variant	Время инкубации*, мин Time of incubation, min	I_{404}/I_{456} Контроль Control	I_{404}/I_{456} β -1,3-глюкан β -1,3-glucan	Варианты сравнения Comparison options	<i>t</i>	<i>P</i>
1	7	9,43 ± 0,52		1 и 4	6,19	0,001
2	18		6,51 ± 0,06	2 и 5	7,55	0,002
3	30	10,76 ± 0,58		3 и 4	6,98	0,001
4	42		6,87 ± 0,32	4 и 6	9,05	<0,001
5	59	12,61 ± 0,81		1 и 5	3,46	0,014
6	72		13,24 ± 0,96	1 и 6	3,82	0,008

П р и м е ч а н и е. * – смещение времени инкубации между контролем и опытом обусловлено техникой последовательной прижизненной регистрации флуоресценции.

N o t e. * – the incubation time offset between control and experiment is caused the technique of sequential lifetime registration of fluorescence.

Следует отметить, что по направленности изменений рН эффект глюкоана отличался от действия на срезанные листья ячменя использованного нами ранее иммуномодулятора иной природы – β -аминомасляной кислоты (АМК), под влиянием которой работа АТФаз в первые десятки минут инкубации листьев ячменя тормозилась в большей степени, чем при простом механическом повреждении, и внутриклеточная среда становилась более кислой по сравнению с контролем [11]. Таким образом, сам по себе β -1,3-глюкан, в отличие от АМК, действовавшей как ксенобиотик, не обладал стрессорным эффектом, во всяком случае при использованной в работе концентрации.

На рис. 2 показаны результаты действия грибного заражения интактных проростков и влияние предварительной обработки β -1,3-глюканом на величину рН в апопласте (*a*) и цитоплазме (*b*).

Прежде всего, видно, что в контрольном варианте содержимое апопласта было более кислым (рН = 4,90 ± 0,03), чем цитоплазмы (рН = 5,79 ± 0,40). Это можно объяснить выкачиванием протонов из цитоплазмы в апопласт. В результате заражения проростков грибом *Bipolaris s.* величина рН апопласта существенно возростала (6,60 ± 0,30) по сравнению с контролем (4,90 ± 0,03), что может свидетельствовать о снижении активности водородной помпы на плазмалемме. Предобработка глюкоаном позволила уменьшить ингибирующее влияние грибного заражения на активность выхода протонов из цитоплазмы в апопласт, в результате чего величина рН последнего (5,56 ± 0,27) снизилась на 1,04 единицы по сравнению с инфицированным вариантом (6,60 ± 0,30), отражая более активное поступление протонов в апопласт. Различия между всеми вариантами на уровне изменений рН апопласта подтверждены статистически (табл. 2).

Анализ результатов изменений рН в цитоплазме (рис. 2, *b*) при грибном заражении на фоне предобработки глюкоаном и без нее свидетельствует о более сложных регуляторных взаимоотношениях между апопластом и цитоплазмой при действии глюкоанов, которые нельзя объяснить влиянием последних только на активность водородных помп на плазмалемме. Прежде всего, через 2 суток после заражения нам не удалось обнаружить такого классического последствия

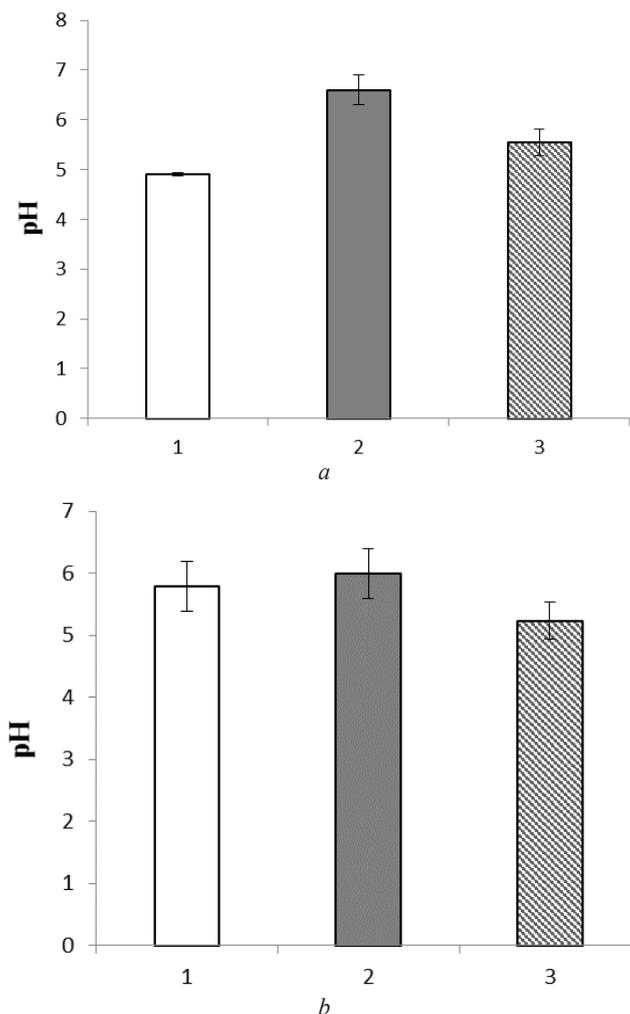


Рис. 2. Изменение рН апопласта (а) и цитоплазмы (b) в верхней части листа 7-дневных проростков ячменя, выращенных на воде (1); инокулированных в 5-дневном возрасте спорами *Bipolaris s.* (2); обработанных в 4-дневном возрасте раствором β -1,3-глюкана (0,01 %), а в 5-дневном возрасте – спорами *Bipolaris s.* (3)

Fig. 2. Changes in the pH of the apoplast (a) and of the cytoplasm (b) at the top of the leaf of 7-day-old barley seedlings grown on water (1); inoculated with *Bipolaris s.* spores at the age of 5 days (2); and treated at the age of 4 days with a solution of β -1,3-glucan (0.01 %), and at 5-day age – by the spores of *Bipolaris s.* (3)

Т а б л и ц а 2. Статистическая обработка результатов измерения величины рН в апопластах верхней части листа 7-дневных проростков ячменя, выращенных на воде (1), инокулированных спорами *Bipolaris s.* в 5-дневном возрасте (2), и проростков, обработанных в 4-дневном возрасте раствором β -глюкана из эвглены (0,01 %), а в 5-дневном возрасте – спорами *Bipolaris s.* (3)

Table 2. Statistical processing of pH measurements in apoplasts of at the top of the leaf of 7-day-old barley seedlings grown on water (1), inoculated with *Bipolaris s.* spores at the age of 5 days (2), and seedlings treated at the age of 4 days with a solution of β -glucan from euglena (0.01 %), and at 5-day age – by the spores of *Bipolaris s.* (3)

Вариант Variant	pH	Варианты сравнения Comparison options	t	P
1. Контроль	4,90 ± 0,03	1 и 2	6,33	0,002
2. <i>Bipolaris s.</i>	6,60 ± 0,30	2 и 3	3,37	0,015
3. β -1,3-глюкан + <i>Bipolaris s.</i>	5,56 ± 0,20	1 и 3	2,95	0,032

биотического стресса, как закисление цитоплазмы, которое должно было случиться при ингибировании протонной помпы на плазмалемме, если бы она была единственным регулятором рН цитоплазмы. Следует отметить, что закисление цитоплазмы при инфицировании могло происходить и в результате повреждения вакуолей, в то время как защелачивание – при избирательном активировании АТФаз на тонопласте, закачивающих протоны в вакуоли. В действительности же

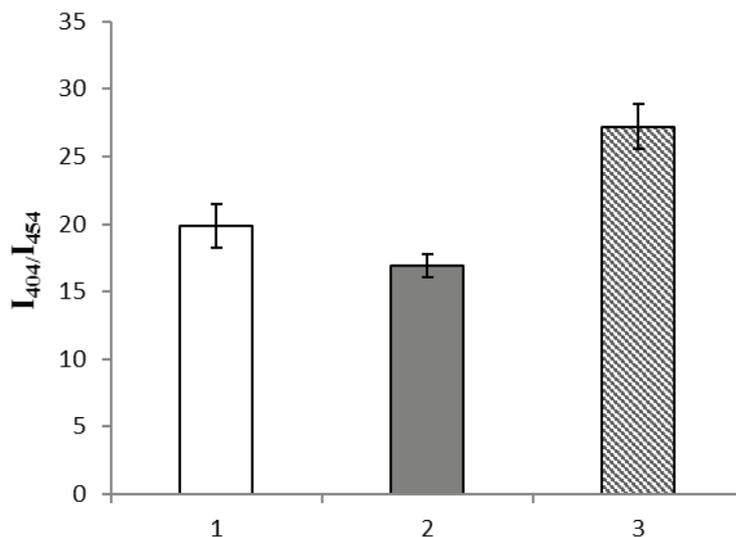


Рис. 3. Изменение параметров флуоресценции пиранина (I_{404}/I_{456}) в верхней части листа 7-дневных проростков ячменя, выращенных на воде (1); инокулированных спорами *Bipolaris s.* в 5-дневном возрасте (2); обработанных в 4-дневном возрасте раствором β -1,3-глюкана (0,01 %), а в 5-дневном возрасте – спорами *Bipolaris s.* (3)

Fig. 3. The change in the fluorescence parameters of pyranine (I_{404}/I_{456}) at the top of the leaf of 7-day-old barley seedlings grown on water (1); inoculated with *Bipolaris s.* spores at the age of 5 days (2); treated at the age of 4 days with a solution of β -1,3-glucan (0.01 %), and at 5-day age – by the spores of *Bipolaris s.* (3)

Т а б л и ц а 3. Статистическая обработка результатов измерения параметров флуоресценции пиранина (I_{404}/I_{456}), введенного в верхнюю часть листа 7-дневных проростков ячменя, выращенных на воде (1), инокулированных спорами *Bipolaris s.* (2) в 5-дневном возрасте, и проростков, обработанных в 4-дневном возрасте раствором β -1,3-глюкана из эвглены (0,01 %), а в 5-дневном возрасте – спорами *Bipolaris s.* (3)

Т а b l e 3. Statistical processing of the results of the fluorescence parameters of pyranine (I_{404}/I_{456}) introduced into the top of the leaf of 7-day-old barley sprouts grown on water (1), inoculated with *Bipolaris s.* spores at the age of 5 days (2), and seedlings treated at the age of 4 days with a solution of β -1,3-glucan from euglena (0.01 %), and at 5-day age – by the spores of *Bipolaris s.* (3)

Вариант Variant	I_{404}/I_{456}	Варианты сравнения Comparison options	t	P
1. Контроль	19,86 ± 1,63	1 и 2	1,6	0,183
2. <i>Bipolaris s.</i>	16,89 ± 0,87	2 и 3	4,1	0,015
3. β -1,3-глюкан + <i>Bipolaris s.</i>	27,20 ± 1,68	1 и 3	2,6	0,063

статистически значимые различия в величине рН цитоплазмы между здоровыми и инфицированными растениями отсутствовали ($5,79 \pm 0,40$ и $5,99 \pm 0,40$), а тенденция к закислению цитоплазмы по сравнению с двумя другими вариантами выявилась только в результате предварительной обработки растений глюканом перед заражением ($pH = 5,23 \pm 0,30$). Более четкая картина получена при рассмотрении исходных параметров флуоресценции пиранина (рис. 3, табл. 3), статистический анализ которых показал, что различия между вариантами 2 и 3 вполне надежны ($p < 0,05$).

Известно, что рН в растительных тканях поддерживается комплексом биофизических и биохимических механизмов [14]. При этом главная роль отводится активности H^+ -АТФаз, выкачивающих протоны из цитоплазмы в апопласт или тонопласт [15]. Различить активность двух типов АТФаз можно только с помощью специфических ингибиторов ферментов [15], что предстоит сделать в последующих исследованиях. В результате обработки проростков глюканом перед инфицированием, скорее всего, активизировались АТФазы на плазмалемме и поэтому апопластная среда становилась более кислой, чем при грибном заражении, хотя и не достигала значений, тестируемых в контроле. Однако при этом величина рН внутриклеточной среды изменялась также в сторону большего закисления, а не защелачивания (последнее мы наблюдали только в течение короткого времени действия глюкана в срезанных листьях, рис. 1). В связи с этим можно предположить, что последствием обработки проростков глюканом является активизация

нескольких механизмов, действующих внутри цитоплазмы и влияющих на величину ее pH (или ответственных за ее поддержание). Иными словами, наряду с тем, что глюкан каким-то образом препятствовал снижению активности протонных насосов на плазмалемме при последующем грибном заражении (возможно, оказывая опосредованное влияние на количество соответствующих АТФаз), его действие распространялось и на биохимические события в цитоплазме, поддерживающие в ней более высокий уровень протонов. Не исключено, что при этом начинал активнее работать биохимический pH-стат [14]. Такие процессы на уровне цитоплазмы явно не происходили при инфицировании растений ячменя грибным патогеном. Таким образом, используя флуоресцентные зонды *in vivo*, мы показали, что величина pH в цитоплазме отражает не только работу АТФаз на плазмалемме, но и, возможно, направленность биохимических процессов, поддерживающих, в конечном итоге, буферную емкость цитоплазмы.

Заключение. Полученные результаты продемонстрировали эффективность применения флуоресцентных зондов для исследования направленности прижизненных изменений pH в проростках злаков. Важно подчеркнуть, что рассчитанные величины pH для разных компартментов достаточно хорошо совпадали с имеющимися в литературе данными, полученными другими способами [15].

Установлено, что сравнительно быстрый ответ на действие водного раствора β -1,3-глюкана из эвглени (0,01 %) в тканях листа проростков ячменя реализовался в первые 40 мин инкубации и препятствовал наблюдавшемуся в контроле закислению цитоплазмы, характерному для типичной неспецифической реакции растения на раневой стресс. Полученный результат служит указанием на то, что использованная в работе концентрация глюкана не являлась стрессовой и может быть использована при создании иммуномодулирующих составов для защиты растений при патогенезе. Обнаружен пролонгированный эффект β -1,3-глюкана (0,01 %) на уровне апопласта, указывающий на возможность усиления работы АТФаз, закачивающих протоны из цитоплазмы в апопласт, активность которых снижалась при заражении *Bipolaris s.* Одновременно влияние глюкана при последующем грибном заражении проявилось также и в поддержании более кислой среды цитоплазмы, вероятно, в результате воздействия на биохимические процессы, участвующие в регуляции pH.

Проведенные исследования, помимо их важности для понимания природы механизмов действия β -глюкана, способствуют его оптимальному использованию в качестве иммуномодулятора, обеспечивающего повышение устойчивости растений ячменя к поражению *Bipolaris s.*

Список использованных источников

1. Поликсенова, В. Д. Индуцированная устойчивость растений к патогенам и абиотическим стрессовым факторам (на примере томата) / В. Д. Поликсенова // Вестн. БГУ. Сер. 2. – 2009. – № 1. – С. 48–60.
2. Лукьянчук, В. Д. Бета-глюканы как основа создания средств иммуномодулирующего действия / В. Д. Лукьянчук, Е. М. Мищенко, М. Н. Бабенко // Український медичний часопис. – 2011. – № 5 (85). – С. 92–93.
3. An ancient enzyme domain hidden in the putative beta-glucan elicitor receptor of soybean may play an active part in the perception of pathogen-associated molecular patterns during broad host resistance / J. Fliegmann [et al.] // J. Biol. Chem. – 2004. – Vol. 279, N 2. – P. 1132–1140. <https://doi.org/10.1074/jbc.m308552200>
4. Linear beta-1,3 glucans are elicitors of defense responses in tobacco / O. Klarzynski [et al.] // Plant Physiol. – 2000. – Vol. 124, N 3. – P. 1027–1038. <https://doi.org/10.1104/pp.124.3.1027>
5. Elicitor-active oligosaccharides from algal laminaran stimulate the production of antifungal compounds in alfalfa / A. Kobayashi [et al.] // Zeitschrift für Naturforschung. – 1993. – Vol. 48, N 7–8. – P. 575–579. <https://doi.org/10.1515/znc-1993-7-808>
6. Кабашникова, Л. Ф. Молекулярные механизмы взаимодействия растений и фитопатогенов: врожденный иммунитет / Л. Ф. Кабашникова // Журн. Белорусского государственного ун-та. Экология. – 2018. – № 2. – С. 26–37.
7. Пересыпкин, В. Ф. Атлас болезней полевых культур / В. Ф. Пересыпкин. – Киев, 1981. – 248 с.
8. pH regulation in apoplastic and cytoplasmic cell compartments of leaves / G. Savchenko [et al.] // Planta. – 2000. – Vol. 211, N 2. – P. 246–255. <https://doi.org/10.1007/s004250000280>
9. Sjoback, R. Absorbtion and fluorescence properties of fluorescein / R. Sjoback, J. Nygren, M. Kubista // Spectrochimica acta. Part A. – 1995. – Vol. 51, N 6. – P. 7–21. [https://doi.org/10.1016/0584-8539\(95\)01421-p](https://doi.org/10.1016/0584-8539(95)01421-p)
10. Савченко, Г. Е. Способ определения pH в апопласте листьев растений злаков / Г. Е. Савченко, Л. В. Пашкевич, Ю. А. Власова // Молекулярные, мембранные и клеточные основы функционирования биосистем: сб. ст. в 2 ч. – Минск, 2014. – Ч. 2. – С. 53–55.
11. Savchenko, G. E. Effect of exogenous β -amino butyric acid on *exo*- and *endo*-cellular pH and redox state of ascorbate in leaves of barley seedlings (*Hordeum vulgare* L.) / G. E. Savchenko, L. F. Kabashnikova, L. M. Abramchik // Genetics and Plant Physiology. – 2016. – Vol. 6, N 3–4. – P. 158–166.

12. Катичева, Л. А. Количественное определение изменений pH при генерации потенциалов возбуждения в стебле высшего растения методом спектрофлуориметрии / Л. А. Катичева, Е. К. Акинчиц, В. А. Воденев // Вестн. Нижегородского ун-та им. Н. И. Лобачевского. – 2012. – № 3 (1). – С. 118–121.

13. Giuliano, K. A. Determination of intracellular pH of BALB/c-3T3 cells using the fluorescence of pyranine / K. A. Giuliano, R. J. Gilles // *Anal. Biochim.* – 1987. – Vol. 167, N 2. – P. 362–371. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(87\)90178-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(87)90178-3)

14. Куличихин, К. Ю. Активность ферментов биохимического pH-стата в кончиках корней злаков в условиях кислородной недостаточности / К. Ю. Куличихин, Т. В. Чиркова, К. В. Фагерстедт // Физиология растений. – 2009. – Т. 56, № 3. – С. 418–430.

15. Особенности регуляции вакуолярной H⁺-АТФазы растительных клеток / А. А. Кирпичникова [и др.] // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Сер. 3. – 2016. – Вып. 2. – С. 149–160.

References

1. Poliksenova V. D. Induced resistance of plants to pathogens and abiotic stress factors. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 2 [Bulletin of the Belorussian State University. Series 2]*, 2009, no. 1, pp. 48–60 (in Russian).

2. Lukianchuk V. D., Mischenko E. M., Babenko M. N. Beta-glucans as the basis for the creation of immunomodulatory agents. *Ukrainskiy medichniy chasopis [Ukrainian Medical Journal]*, 2011, no. 5 (85), pp. 92–93 (in Russian).

3. Fliegmann J., Mithöfer A., Wanner G., Ebel J. An ancient enzyme domain hidden in the putative beta-glucan elicitor receptor of soybean may play an active part in the perception of pathogen-associated molecular patterns during broad host resistance. *Journal of Biological Chemistry*, 2004, vol. 279, no. 2, pp. 1132–1140. <https://doi.org/10.1074/jbc.m308552200>

4. Klarzynski O., Plesse B., Joubert J. M., Yvin J. C., Kopp M., Kloareg B., Fritig B. Linear beta-1,3 glucans are elicitors of defense responses in tobacco. *Plant Physiology*, 2000, vol. 124, no. 3, pp. 1027–1038. <https://doi.org/10.1104/pp.124.3.1027>

5. Kobayashi A., Tai A., Kanzaki H., Kawazu K. Elicitor-active oligosaccharides from algal laminaran stimulate the production of antifungal compounds in alfalfa. *Zeitschrift für Naturforschung*, 1993, vol. 48, no. 7–8, pp. 575–579. <https://doi.org/10.1515/znc-1993-7-808>

6. Kabashnikova L. F. Molecular mechanisms of plants and phytopatogens interaction: innate immunity. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya = Journal of the Belorussian State University. Ecology*, 2018, no. 2, pp. 26–37 (in Russian).

7. Peresypkin V. F. *Atlas of diseases of field crops*. Kiyev, 1981. 248 p. (in Russian).

8. Savchenko G., Wiese C., Neimanis S., Hedrich R., Heber U. PH regulation in apoplastic and cytoplasmic cell compartments of leaves. *Planta*, 2000, vol. 211, no. 2, pp. 246–255. <https://doi.org/10.1007/s004250000280>

9. Sjoback R., Nygren J., Kubista M. Absorption and fluorescence properties of fluorescein. *Spectrochimica acta. Part A*, 1995, vol. 51, no. 6, pp. 7–21. [https://doi.org/10.1016/0584-8539\(95\)01421-p](https://doi.org/10.1016/0584-8539(95)01421-p)

10. Savchenko G. E., Pashkevich L. V., Vlasova Yu. A. Method for determination of pH in the apoplast of leaves of cereal plants. *Molekulyarnyye, membrannyye i kletochnyye osnovy funktsionirovaniya biosistem [Molecular, membrane and cellular basis of functioning of biosystems]*. Minsk, 2014, vol. 2, pp. 53–55 (in Russian).

11. Savchenko G. E., Kabashnikova L. F., Abramchik L. M. Effect of exogenous β-amino butyric acid on exo- and endo-cellular pH and redox state of ascorbate in leaves of barley seedlings (*Hordeum vulgare* L.). *Genetics and Plant Physiology*, 2016, vol. 6, no. 3–4, pp. 158–166.

12. Катичева Л. А., Акинчиц Е. К., Воденев В. А. Quantitation of pH changes in a higher plant stem at generation of excitation potentials using the spectrofluorimetric method. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2012, vol. 3, no. 1, pp. 118–121 (in Russian).

13. Giuliano K. A., Gilles R. J. Determination of intracellular pH of BALB/c-3T3 cells using the fluorescence of pyranine. *Analytical Biochemistry*, 1987, vol. 167, no. 2, pp. 362–371. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(87\)90178-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(87)90178-3)

14. Kulichikhin K. Y., Fagerstedt K. V., Chirkova T. V. Activity of biochemical pH-stat enzymes in cereal root tips under oxygen deficiency. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2009, vol. 56, no. 3, pp. 377–388.

15. Kirpichnikova A. A., Chen T., Romanyuk D. A., Yemelyanov V. V., Shishova M. F. Peculiar features of plant cell vacuolar H⁺-ATPase regulation. *Vestnik Sant-Peterburgskogo universiteta. Seriya 3 = Vestnik of Saint Petersburg University. Series 3*, 2016, vol. 2, pp. 149–160 (in Russian).

Информация об авторах

Савченко Галина Евсеевна – канд. биол. наук, доцент, ст. науч. сотрудник. Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gesavchenko@gmail.com.

Бачище Татьяна Сергеевна – мл. науч. сотрудник. Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tatsiana.bachyshcha@gmail.com.

Кабашникова Людмила Федоровна – член-корреспондент, д-р биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kabashnikova@ibp.org.by.

Information about the authors

Savchenko Galina Evseevna – Ph. D. (Biology), Associated professor, Senior researcher. Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gesavchenko@gmail.com.

Bachyshcha Tatsiana Sergeevna – Junior researcher. Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tatsiana.bachyshcha@gmail.com.

Kabashnikova Liudmila Fedorovna – Corresponding Member, D. Sc. (Biology), Associated professor, Head for the Laboratory. Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kabashnikova@ibp.org.by.

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

УДК 574.5; 574.633; 577.33/34; 577.355
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-325-330>

Поступило в редакцию 18.02.2019
Received 18.02.2019

О. С. Смольская, А. А. Жукова, Б. В. Адамович

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОТРОФНОЙ КОМПОНЕНТЫ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В ОЗЕРАХ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «НАРОЧАНСКИЙ»

(Представлено членом-корреспондентом В. П. Семенченко)

Аннотация. Исследования на 32 озерах Национального парка «Нарочанский» были направлены на изучение количественных и качественных характеристик автотрофной компоненты планктона, а также поиск их связи с данными спектрального анализа пигментного состава. На основании содержания хлорофилла в летнее время года (июль–август) основную часть исследуемых озер можно отнести к мезотрофному типу, 2 – к олиготрофным, 10 – к эвтрофным. Содержание хлорофилла-а в озерах колебалось от 0,3 до 55,2 мкг/л, сестона – от 0,3 до 29,8 мг/л. Пигментные индексы, отражающие состояние планктонных продуцентов, существенно не изменялись в зависимости от трофического статуса озера, однако в более трофных водах спектры поглощения прописываются более четко, соответственно, индексы более надежны и информативны.

Ключевые слова: озера Национального парка «Нарочанский», пигментные индексы, спектры поглощения, хлорофилл, сестон, растворенный кислород

Для цитирования: Смольская, О. С. Спектральные характеристики автотрофной компоненты взвешенного вещества в озерах Национального парка «Нарочанский» / О. С. Смольская, А. А. Жукова, Б. В. Адамович // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 325–330. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-325-330>

Volha S. Smolskaya, Hanna A. Zhukava, Boris V. Adamovich

Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THE AUTOTROPHIC COMPONENT OF SUSPENDED MATTER IN THE LAKES OF THE NATIONAL PARK “NAROCHANSKY”

(Communicated by Corresponding Member Vitaly P. Semchenko)

Abstract. The studies on 32 lakes of the National Park “Narochansky” were aimed both at studying quantitative and qualitative characteristics of the autotrophic component of plankton and at finding their correlation with the data of spectral analysis of pigment composition. On the basis of the chlorophyll content in the summer season (July–August), the main part of the sampled lakes can be attributed to the mesotrophic type, 2 lakes – oligotrophic, 10 – eutrophic. The content of chlorophyll-a in the lakes ranged from 0.3 to 55.2 µg/l, seston – from 0.3 to 29.8 mg/l. Pigment indices, reflecting the state of planktonic producers, did not change significantly depending on the trophic state of the lake. However, in more trophic waters, the absorption spectra are written more clearly; accordingly, the indices appear to be more reliable and informative.

Keywords: lakes of National Park “Narochansky”, pigment indices, absorption spectra, chlorophyll, seston, dissolved oxygen

For citation: Smolskaya V. S., Zhukava H. A., Adamovich B. V. Spectral characteristics of the autotrophic component of suspended matter in the lakes of National park “Narochansky”. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 325–330 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-325-330>

Введение. Водные экосистемы являются одной из основных составляющих экологического каркаса Национального парка «Нарочанский». Комплексные исследования фотосинтетических пигментов с применением современного спектрофотометрического оборудования позволяют на основании определения концентрации хлорофилла-а в воде судить о функциональном состоянии фитопланктона и уровне его развития, т. е. получать количественную характеристику [1].

Некоторые показатели качественного состава водорослей можно определить путем изучения спектральных характеристик их пигментного состава, что позволяет оценить соотношение определенных таксономических групп водорослей, долю живых и мертвых клеток в сообществе. Определение спектральных индексов в воде дает возможность использования их в качестве интегральных показателей при оценке экологического состояния озерных экосистем Национального парка «Нарочанский».

Цель работы – проанализировать основные гидроэкологические показатели и оценить связь спектральных индексов и структурных характеристик фитопланктона.

Материалы и методы исследования. На территории Национального парка «Нарочанский» расположено 43 озера, которые по признакам географического расположения и принадлежности к одной речной системе разделены на 5 групп: Нарочанскую, Болдукскую, Мядельскую, Свирскую и Швакштинскую, озера Дягили и Кузьмичи не относятся к какой-либо группе [2]. Исследование проводили на 32 озерах в летний период 2017–2018 гг. Всего было отобрано 54 пробы воды, в каждой из которых на базе УНЦ «Нарочанская биологическая станция им. Г. Г. Винберга» проводили измерения содержания sestona и хлорофилла в трех повторностях.

Пробы воды отбирали в чистые сосуды с глубины 0,5 м от поверхности воды (также дополнительно 4–6 и 10 м, если озеро глубокое). Взвешенные в воде вещества определяли гравиметрическим методом после фильтрации проб воды через ядерные фильтры с диаметром пор 1 мкм¹. Для определения содержания хлорофилла и феопигментов в общем экстракте использовали спектрофотометрический метод. Измерение оптической плотности экстракта проводили на спектрофотометре Cary 50 (USA), приложение Scan, в диапазоне 350–800 нм с шагом 1 нм. Определение концентрации растворенного в воде кислорода проводили по методу Винклера [1].

Результаты и их обсуждение. В рамках данного исследования в июле–августе были проведены разовые наблюдения основных гидроэкологических показателей озер Национального парка «Нарочанский». В исследованных водоемах содержание растворенного кислорода изменялось в пределах 5,76–10,82 мгО₂/л, степень насыщения воды кислородом колебалась от 68 до 144 %, характеризуя кислородный режим как благоприятный. Прозрачность озер в местах отбора проб колебалась в пределах 0,6–5,0 м. Средняя температура за период наблюдений составила 20 °С, минимальная температура при отборе проб – 12 °С (озеро Болдук на глубине 10 м), максимальная – 26 °С (озеро Глухое на глубине 0,5 м).

Полученные данные позволили провести градацию по трофности всех озер Национального парка «Нарочанский» на основании единого показателя – концентрации хлорофилла-*a* в толще воды [1]. В табл. 1 и далее представлены средние значения (\pm SD).

За исследованный период содержание sestona по группам показало следующие средние значения: Нарочанская – $6,3 \pm 2,2$ мг/л, Болдукская – $3,0 \pm 3,0$ мг/л, Мядельская – $3,4 \pm 1,3$ мг/л, Свирская – $8,2 \pm 3,4$ мг/л. Содержание хлорофилла по группам характеризовалось следующими средними величинами: Нарочанская – $14,3 \pm 6,2$ мкг/л, Болдукская – $8,2 \pm 6,2$ мкг/л, Мядельская – $3,4 \pm 1,7$ мкг/л, Свирская – $12,0 \pm 5,4$ мкг/л. Трофический статус озер, определенный по содержанию хлорофилла, различался от олиготрофного (Окунек, Ильшня) до эвтрофного (Скрипово).

Необходимо отметить, что пигментные индексы редко используются как маркеры состояния фитопланктона и качества воды. В данной работе рассмотрены две группы индексов: индексы контроля чистоты экстракта пигментов и правильности прописывания спектра светопоглощения, предложенные нами ранее; а также индексы, отражающие состояние первичных продуцентов в водоеме [3–7]. Полученные значения индексов были сопоставлены с уровнем трофического статуса исследованных озер (табл. 2).

Значения индексов контроля чистоты экстрактов должны быть больше 1 и отображать отношения длинно- и коротковолновые пиков спектра поглощения (на длине волны 430 и 664 нм), а также его спада (530 нм) и фонового значения (720 нм). Вспомогательные индексы E_{430}/E_{530} и E_{664}/E_{530} показывают соотношение максимального поглощения в синей и красной области спектра соответственно к минимальному значению в центральной области спектра. Причем, проанализи-

¹ Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла-*a*: ГОСТ 17.1.04.02.90. – М., 2009. – 25 с.

Т а б л и ц а 1. Гидрохимические показатели в озерах Национального парка «Нарочанский»

Table 1. Hydrochemical indices in the lakes of the National Park “Narochansky”

Озеро Lake	Хлорофилл, мкг/л Chlorophyll, mcg/l	Сестон, мг/л Seston, mg/l	Содержание хлорофилла в сестоне, % Chlorophyll content in seston, %	Доля феопигментов, % Share of feopigments, %
<i>Олиготрофные</i>				
Окунек*	0,32 ± 0,12	0,27 ± 0,16	0,12	45
Ильшния*	0,68 ± 0,07	0,97 ± 0,25	0,07	80
<i>Мезотрофные</i>				
Россохи	1,10 ± 0,12	0,94 ± 0,13	0,12	65
Болдук	1,30 ± 0,52	1,08 ± 0,23	0,11	66
Ячменец	1,26 ± 0,15	1,85 ± 0,22	0,07	66
Глубля	1,52 ± 0,12	1,27 ± 0,29	0,12	50
Ходосы	1,83 ± 0,08	1,53 ± 0,12	0,12	8
Свирьнище	1,94 ± 0,17	1,62 ± 0,04	0,12	78
Глухое	1,98 ± 0,21	1,13 ± 0,09	0,18	53
Волчино	2,09 ± 0,62	2,88 ± 0,16	0,08	28
Черток*	2,16 ± 0,34	2,53 ± 0,71	0,09	17
Дягили	2,58 ± 0,10	1,90 ± 0,08	0,14	27
Грядское*	2,59 ± 0,27	1,78 ± 0,38	0,15	65
Мядель	3,68 ± 1,40	2,20 ± 0,51	0,15	31
Белое	3,91 ± 1,10	2,15 ± 0,67	0,20	57
Козье*	4,23 ± 0,67	2,28 ± 0,37	0,19	25
Барсуки*	4,32 ± 0,32	1,69 ± 0,46	0,26	32
Глубелька	5,14 ± 0,33	1,51 ± 0,08	0,23	66
Лотвины	5,53 ± 1,69	4,32 ± 2,50	0,14	44
Мертвое*	5,99 ± 1,57	2,75 ± 1,06	0,22	61
Княгининское*	6,69 ± 1,40	19,54 ± 0,6	0,03	60
Млынок*	9,18 ± 0,32	1,90 ± 0,70	0,48	39
<i>Эвтрофные</i>				
Свирь	12,31 ± 2,5	6,60 ± 2,80	0,23	52
Шестакова*	14,85 ± 2,71	7,25 ± 1,48	0,20	68
Кузьмичи	16,71 ± 0,43	27,8 ± 1,45	0,06	18
Подшапье*	20,67 ± 0,60	4,11 ± 0,84	0,50	24
Красник*	21,42 ± 1,85	9,75 ± 0,50	0,22	62
Глухое*	24,17 ± 0,61	15,3 ± 1,90	0,16	80
Швакшты	30,28 ± 0,18	24,72 ± 1,6	0,12	27
Вишневское	30,45 ± 1,70	29,8 ± 2,62	0,10	60
Амшерник*	53,70 ± 3,28	13,5 ± 0,83	0,40	53
Скрипово*	55,21 ± 4,68	29,07 ± 4,06	0,19	64

Примечание. * – озера характеризуются как дистрофные по литературным данным [2].

Note. * – the lakes are characterized as dystrophic according to the data [2].

Т а б л и ц а 2. Пигментные индексы озер Национального парка «Нарочанский»

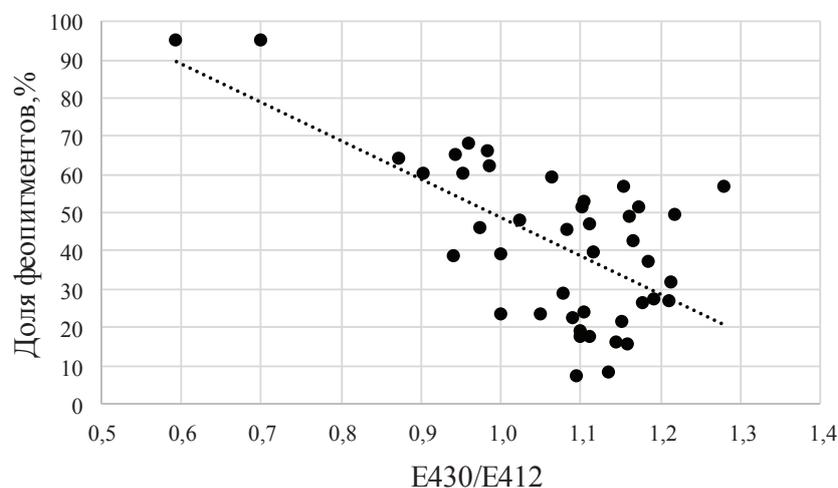
Table 2. Pigment indices of the lakes of the National Park “Narochansky”

Трофический статус водоема [1] Trophic status of the reservoir [1]	Пигментные индексы контроля чистоты экстракта Pigment indices control the purity of the extract					Пигментные индексы состояния первичных продуцентов озер Pigment indices of the state of the primary producers of lakes			
	E_{664}/E_{720}	E_{430}/E_{720}	E_{530}/E_{720}	E_{430}/E_{530}	E_{664}/E_{530}	E_{480}/E_{664}	E_{450}/E_{480}	E_{430}/E_{664}	E_{430}/E_{412}
Олиготрофный	2,13 ± 0,24	3,12 ± 1,78	1,15 ± 0,34	4,02 ± 2,42	1,21 ± 0,29	1,21 ± 0,54	1,41 ± 0,27	2,40 ± 1,84	1,02 ± 0,29
Мезотрофный	11,80 ± 9,31	26,12 ± 9,91	3,08 ± 2,83	7,73 ± 7,43	3,46 ± 2,41	1,02 ± 0,20	1,48 ± 0,22	2,05 ± 0,38	1,08 ± 0,09
Эвтрофный	23,84 ± 9,05	51,03 ± 9,10	4,88 ± 4,11	14,05 ± 5,32	6,18 ± 6,10	1,02 ± 0,16	1,46 ± 0,23	2,17 ± 0,49	1,08 ± 0,15

зировав данные, видно, что индекс E_{430}/E_{530} дает в 2 раза большее значение, чем индекс E_{664}/E_{530} для озер с различным уровнем трофности. Индексы E_{664}/E_{720} и E_{430}/E_{720} показывают максимальное поглощение синей и красной области спектра соответственно к минимальному (фоновому) значению в красной области спектра, при этом значение E_{664}/E_{720} также меньше индекса E_{430}/E_{720} , что связано с большей высотой пика светопоглощения в синей области спектра. Индекс E_{530}/E_{720} показывает соотношение минимального значения в зеленой области спектра к минимальному (фоновому) значению в дальней красной области спектра.

Исходя из данных, представленных в табл. 2, можно сделать вывод, что значения индексов контроля чистоты экстракта в среднем увеличиваются по мере возрастания трофического статуса озера, что связано с большим количеством пигментов в экстракте и, соответственно, более выраженным пигментным спектром поглощения. Таким образом, если спектры поглощения пигментов планктона прописываются четко, без выбросов, то можно быть уверенными в отсутствии мешающих примесей в экстракте и правильности результатов дальнейшего расчета пигментных индексов, характеризующих состояние фитопланктона [3]. Индексы контроля чистоты экстракта показывают, что в олиготрофных водах пигментные индексы будут менее надежны и информативны в сравнении с мезо- и эвтрофными водами, где отношение светопоглощения на пиках и спадах пигментного спектра в несколько раз больше, чем в олиготрофных.

Скорректированный индекс E_{430}/E_{412} отображает изменения, которые происходят с молекулами хлорофилла при деградации – сдвиг синего максимума спектра поглощения в более коротковолновую область [4]. Значения индекса E_{430}/E_{412} , полученные для озер Национального парка, колебались от 0,59 до 1,29 ($1,07 \pm 0,12$), свидетельствуя, что в большей части проб преобладал фотосинтетически активный хлорофилл, за исключением нескольких образцов. На рисунке показана связь между значением индекса E_{430}/E_{412} и долей феопигментов. Коэффициент корреляции $r = -0,63$ ($n = 43$). Примечательно, что медианная доля феопигментов в пробе соответствует значению индекса равному 1, что можно использовать для экспресс-анализа степени деградации хлорофилла в пробе (если $E_{430}/E_{412} < 1$, то доля феопигментов составляет менее 50 %).



Связь индекса E_{430}/E_{412} с долей феопигментов (%) в экстрактах фитопланктона озер Национального парка «Нарочанский»
The relationship between the index of E_{430}/E_{412} and the fraction of pheopigments (%) in phytoplankton extracts of the lakes of the National park “Narochansky”

Индекс E_{450}/E_{480} может быть использован как показатель степени развития отдельных отделов водорослей и цианобактерий (ввиду отсутствия у последних каротиноидов в пигментном составе). Для исследованных образцов воды озер Национального парка «Нарочанский» значения индекса E_{450}/E_{480} практически везде были больше 1,5 (1,14–3,00), что может свидетельствовать о преобладании в большинстве проб пигментов зеленых и диатомовых водорослей [5; 7].

Индексы E_{480}/E_{664} и E_{430}/E_{664} характеризуют соотношение общих каротиноидов и хлорофилла-*a*. Считается, что повышение этих индексов свидетельствует об ухудшении «физиологическо-

го» состояния фитопланктона и увеличения его пигментного разнообразия [3; 5; 6]. По исследованным нами пробам воды индекс E_{430}/E_{664} изменялся в пределах от 1,0 до 4,5, среднее значение ($\pm Sd$) было $2,3 \pm 1,4$; аналогичные значения для индекса E_{480}/E_{664} составили $1,1 \pm 0,3$, при колебаниях от 0,7 до 3,0. Зависимости между значениями индекса и уровнем трофности исследуемых озер не выявлено.

Заключение. В результате проведенной работы были проанализированы спектры поглощения пигментов фитопланктона для озер Национального парка «Нарочанский». В ходе работы рассчитаны пигментные индексы E_{450}/E_{480} , E_{480}/E_{664} , E_{430}/E_{664} , E_{430}/E_{412} , отражающие состояние планктонных продуцентов в экосистеме, а также вспомогательные пигментные индексы контроля чистоты экстракта и четкости прописанного спектра (E_{664}/E_{720} , E_{430}/E_{720} , E_{530}/E_{720} , E_{430}/E_{530} и E_{664}/E_{530}). Показано, что пигментные индексы могут быть использованы в качестве одного из параметров оценки качества воды для всех типов водоемов вне зависимости от уровня их трофии и состояния фитопланктона. Следует, однако, отметить, что с изменением трофического статуса водоема (от олиготрофного до эвтрофного) увеличиваются значения индексов контроля чистоты экстракта, что говорит о том, что спектры поглощения прописываются более четко, соответственно, индексы более надежны. В целом, колебания индексов состояния первичных продуцентов для озер различного трофического статуса незначительны, однако разброс значений уменьшается по всем индексам с увеличением трофности, что также свидетельствует о большей репрезентативности индексов в водах с более высоким удельным содержанием пигментов.

По содержанию хлорофилла большинство озер имели средний трофический статус при колебаниях от олиготрофных до высокоэвтрофных. В исследованных пробах воды отмечается большой размах колебаний доли феопигментов в суммарном форбине 8–80 % (среднее по всем озерам составило 43 %). Среднее содержание хлорофилла-*a* составило 8,9 мкг/г (при колебаниях от 0,3 до 55,2 мкг/л), содержание сестона – 5,7 мг/л, доля хлорофилла в сестоне – 0,17 % (изменяясь соответственно от 0,3 до 29,8 мг/л и от 0,03 до 0,50 %). Связь между глубиной отбора проб воды в глубоководных озерах Национального парка «Нарочанский» и их гидроэкологическими показателями не выявлена. Кислородный режим обследованных озер характеризовался как благоприятный для гидробионтов.

Полученные гидроэкологические данные дополняют базу многолетних наблюдений за озерами Национального парка «Нарочанский», а также позволяют проводить оперативную оценку текущего состояния озер с целью сохранения их уникальных черт и природного богатства.

Благодарности. Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке БРФФИ.

Acknowledgements. The study is partially sponsored by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research.

Список использованных источников

1. Винберг, Г. Г. Первичная продукция водоемов / Г. Г. Винберг. – Минск, 1979. – С. 187–269.
2. Водные ресурсы Национального парка «Нарочанский» / А. Г. Аронов [и др.]. – Минск, 2012. – 128 с.
3. Смольская, О. С. Спектральные пигментные индексы фитопланктона в разнотипных водных объектах Беларуси / О. С. Смольская, А. А. Жукова // Журн. Белорусского государственного ун-та. Экология. – 2018. – № 1. – С. 113–123.
4. Бульон, В. В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов / В. В. Бульон // Тр. Зоол. ин-та АН СССР. – 1983. – Т. 98. – 149 с.
5. Связь спектральных характеристик пигментного состава и структурных показателей фитопланктона в р. Свислочь / Т. М. Михеева [и др.] // Журн. Белорусского государственного ун-та. Экология. – 2018. – № 4. С. 42–51.
6. Сигарева, Л. Е. Значимость пигментных характеристик фитопланктона при оценке качества воды / Л. Е. Сигарева, Е. А. Лешенко // Водные ресурсы. – 2004. – Т. 31, № 4. – С. 475–480.
7. Сиделев, С. И. Анализ связей пигментных и структурных характеристик фитопланктона высокоэвтрофного озера / С. И. Сиделев, О. В. Бабаназарова // Журн. Сибирского Федерального ун-та. Биология. – 2008. – Т. 1, № 2. – С. 162–177.

References

1. Vinberg G. G. *Primary production of water bodies*. Minsk, 1979, pp. 187–269 (in Russian).
2. Lyushtyk V. S., Zhukova T. V., eds. *Water resources of the National Park "Narochansky"*. Minsk, 2012. 128 p. (in Russian).
3. Smol'skaya O. S., Zhukova A. A. Spectral pigment indices of phytoplankton in various water bodies of Belarus. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya = Journal of the Belorussian State University. Ecology*, 2018, no. 1, pp. 113–123 (in Russian).

4. Bul'on V. V. Primary production of plankton of inland water bodies. *Proceedings of the Zoological Institute*, 1983, vol. 98. 149 p. (in Russian).

5. Mikheyeva T. M., Smol'skaya O. S., Zhukova A. A., Savich I. V. The relationship of the spectral characteristics of the pigment composition and phytoplankton structural indicators in the river Svisloch. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya = Journal of the Belorussian State University. Ecology*, 2018, no. 4, pp. 42–51 (in Russian).

6. Sigareva L. Ye., Lyashenko O. A. Importance of pigment characteristics of phytoplankton in water quality assessment. *Vodnyye resursy = Water Resources*, 2004, vol. 31, no. 4, pp. 475–480 (in Russian).

7. Sidelev S. I., Babanazarova O. V. The Link Analysis of the Pigmentary and Structural Characteristics of the High-Eutrophic Lake Phytoplankton. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2008, vol. 1, no. 2, pp. 162–177 (in Russian).

Информация об авторах

Смольская Ольга Сергеевна – мл. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет (пр-т Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sylimova_1991@mail.ru.

Жукова Анна Анатольевна – канд. биол. наук, доцент. Белорусский государственный университет (пр-т Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: anna_eco@tut.by.

Адамович Борис Владиславович – канд. биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Белорусский государственный университет (пр-т Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: belaqalab@gmail.com.

Information about the authors

Smolskaya Volha Sergeevna – Junior researcher. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sylimova_1991@mail.ru.

Zhukava Hanna Anatolievna – Ph. D. (Biology), Associate professor. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: anna_eco@tut.by.

Adamovich Boris Vladislavovich – Ph. D. (Biology), Associate professor, Head of the Laboratory. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: belaqalab@gmail.com.

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

МЕДИЦИНА

MEDICINE

УДК 612.327:612.367:612.171:612.172.2:612.329.9
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-331-342>

Поступило в редакцию 19.11.2018
Received 19.11.2018

Член-корреспондент В. В. Солтанов, Л. М. Комаровская

Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ИНТЕРОЦЕПТИВНЫЕ ВЛИЯНИЯ ГЛЮТАМАТА НАТРИЯ И ПИЩЕВЫХ ДОБАВОК НА АКТИВНОСТЬ ГЛАДКИХ МЫШЦ ЖЕЛУДКА, КИШЕЧНИКА И СЕРДЕЧНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ КРЫС

Аннотация. Изучено действие пищевых добавок (глутамат, бензоат, тартразин) на модуляцию частоты сердечных сокращений (ЧСС) и активности гладких мышц желудка и ободочной кишки в острых опытах на крысах (наркоз тиопентал натрия, 70 мг/кг внутривенно). Установлено, что однократное введение в желудок каждой из добавок отдельно или совместно приводит к четким эффектам повышения или понижения суммарных потенциалов гладких мышц (ПГМ) без изменений ЧСС. После введения в желудок глутамата внутривенно инъеклируемый адреналин (Adr, 10 мкг) вызывает повышение ЧСС, более значительное, если в желудок инфузировавали все добавки. ПГМ на применение Adr были чаще повышены. В последующем установлено существенное влияние на эффекты длительного использования добавок в пищевом рационе. Как оказалось, применение адреналина в завершающем остром опыте (через месяц кормления добавками) сопровождается не усилением, а, наоборот, ослаблением работы сердца: постепенно падает ЧСС, возникают аритмии, фибрилляции миокарда и затем сердечные сокращения прекращались в 12 из 16 опытов. Эти процессы сопряжены с достоверным снижением в фоновой активности на ЭКГ средней площади RST (в контроле 149 мкВ/с, через месяц опыта 80 мкВ/с, $p < 0,05$) и волны Т (соответственно 82 и 43 мкВ/с, $p < 0,01$) без значимых изменений их продолжительности. Отмечается увеличение или уменьшение площади RST и Т при действии на желудок раздражителей, особенно Adr. Предполагается, что длительное использование пищевых добавок служит предпосылкой для дисфункций в сократительной работе сердца в ситуациях, связанных с быстрым повышением в крови катехоламинов – в условиях различных стрессов, неблагоприятных влияний факторов окружающей среды.

Ключевые слова: пищевые добавки, аритмия, катехоламины, сердце

Для цитирования. Солтанов, В. В. Интероцептивные влияния глутамата натрия и пищевых добавок на активность гладких мышц желудка, кишечника и сердечную деятельность крыс / В. В. Солтанов, Л. М. Комаровская // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 331–342. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-331-342>

Corresponding Member Vladimir V. Soltanov, Ludmila M. Komarovskaya

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

INFLUENCE OF SODIUM GLUTAMATE AND FOOD ADDITIVES ON THE ACTIVITY OF SMOOTH MUSCLES OF THE STOMACH, THE INTESTINES AND THE CARDIAC ACTIVITY OF RATS

Abstract. The present work investigates the action of food additives: sodium glutamate E-621 (720 mg/kg), sodium benzoate E-211 (30 mg/kg), tartrazine E-102 (45 mg/kg) on the modulation of the heart rate (CR) and the activity of smooth muscles of the stomach and the colon in acute experiments on rats. Narcosis – thiopental sodium, 70 mg/kg is made intraperitoneally. It is established that the unitary administration of each of the additives into the stomach separately or everywhere results in precise effects of increase or decrease of total potentials of smooth muscles (PSM) without CR changes. After introducing glutamate into the stomach intravenously infusion adrenaline (Adr, 10 mkg) causes CR to increase more significantly, if all additives are introduced into the stomach, and then Adr. PSMs after the application of Adr were often more stimulating. Later, a subsequent significant influence on the effects of long use of additives in a diet is established. As it has appeared, the application of adrenaline in finishing acute experiment (after a month of feeding by additives) is accompanied not by amplification (strengthening), and, on the contrary, by the disorder of the heart work: CR gradually falls, arrhythmia arises, fibrillations of a myocardium and then cardiac contractions stopped in 12 of 16 experiments. These processes are associated with de-

ing the background activity on an electrocardiogram of the average area of RST (in the control 149 mkV/s, in a month of experience 80 mkV/s, $p < 0.05$) and waves T (82 and 43 mkV/s, respectively, $p < 0.01$) without significant changes of their duration. The increase or decrease of the RST area is seen and T is marked at the action of special ADR on the stomach additives. It is supposed that a long use of food additives serves as the precondition for dysfunctions in the heart work in the situations connected to a fast increase in the blood of catecholamines – in the conditions of various stresses, adverse influences of factors of the environment.

Keywords: food additives, arrhythmia, catecholamines, heart

For citation: Soltanov V. V., Komarovskaya L. M. Influence of sodium glutamate and food additives on the activity of smooth muscles of the stomach, the intestines and the cardiac activity of rats. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 331–342 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-331-342>

Введение. Мононатриевая соль глутаминовой кислоты (глутамат натрия, MS6) широко используется в пищевых продуктах. В общей циркуляции крови сохраняется небольшое количество глутамата, абсорбируемого в желудке, тонкой кишке. Его уровень в центральной нервной системе (ЦНС) выше, чем в сыворотке, за счет имеющихся в различных ядрах глутаминергических нейронов. Согласно современным представлениям глутаминовые нейромедиаторы играют важную роль в регуляции соматических и вегетативных реакций организма, в том числе и при развитии разного рода нарушений, хотя многие физиологические аспекты их участия в центральной регуляции функции изучены недостаточно [1; 2].

Систематическое потребление входящих в продукты пищевых добавок, включающих нутриент глутамат натрия как усилитель вкусовых свойств продуктов, служит дополнительным внешним фактором глутаминергических влияний на нервные сети. О важной роли глутамата свидетельствует тот факт, что интрагастральное применение MS6 активирует в экспериментах на крысах, мышах инсулярную кору мозга, лимбическую систему, гипоталамус, амигдалу, ядро солитарного тракта [1].

В условиях нормы и экстремальных ситуаций поступления MS6 в комплексе с добавками не исключена возможность нарушения функций органов и систем. Следует подчеркнуть, что особенности влияния принимаемых с пищей разного рода неэндогенных веществ на механизмы осуществления нейрогуморальных реакций организма остаются недостаточно изученными.

В задачу настоящей работы входило выявление изменений активности гладких мышц желудка, ободочной кишки и одновременно деятельности сердца по показателям ЭКГ после введения в желудок глутамата отдельно или после использования в пищевом рационе совместно с тартразином и бензоатом натрия длительное время (в течение месяца). Данное сочетание часто применяется в качестве дополнительных компонентов в продуктах.

Материалы и методы исследования. Экспериментальный материал получен в острых опытах на 85 белых крысах-самцах, наркоз – тиопентал натрия (70 мг/кг). Использованы электрофизиологические методы исследования.

Во время опыта животные располагались на термостабильном столике (+27–28 °C). О реакциях судили по изменению потенциалов гладких мышц (ПГМ). Регистрировали активность пилорической части желудка и проксимального отдела ободочной кишки с помощью хлорсеребряных биполярных накладных электродов, подключенных к усилителю биопотенциалов УБФ-4-01 (Россия) компьютеризированной электрофизиологической установки.

Одновременно записывали электрокардиограмму во втором стандартном отведении с помощью стальных игольчатых электродов, связанных с одним из каналов указанного усилителя биопотенциалов. Полоса пропускания для каждого из трех отведений составляла 10–1000 Гц. С выхода усилителя ПГМ сигналы ЭКГ поступали на 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (Спецприбор, Беларусь) с шагом дискретизации 200 мс и записывались на жесткий диск компьютера Pentium II с последующей обработкой в автономной режиме по программам, созданным в Институте физиологии НАН Беларуси и позволяющим, наряду с другими показателями, определять частоту, амплитуду потенциалов, длительность и площадь зубцов ЭКГ [3].

При обработке результатов на ЭВМ количественную оценку ПГМ проводили путем использования автоматического измерения амплитуды каждого потенциала в милливольтгах с учетом его отрицательной и положительной фазы. Полученные данные обрабатывались с помощью

стандартной программы Origin 41. Результаты представляются в виде средней величины и стандартной ошибки средней ($M \pm m$). Парные внутригрупповые сравнения средних производятся при помощи *t*-критерия Стьюдента для зависимых выборок. Различия сравниваемых показателей считались достоверными при $p < 0,05$.

Для проведения хронических экспериментов крысы содержались в виварии. В их стандартный рацион кормления ежедневно (утром, в 10.00, в течение 1 месяца) добавлялись исследуемые препараты (глутамат, тартразин, бензоат натрия) из расчета веса животных. Расчет применяемых препаратов проводился по методике Хабриева: глутамат натрия – 720 мг/кг, бензоат натрия – 30 мг/кг, тартразин – 45 мг/кг веса крысы.

Результаты и их обсуждение. В контрольных опытах инфузия в желудок глутамата не вызывает значимых изменений частоты работы сердца в течение времени наблюдения (60–90 мин). По записям ЭКГ других каких-либо преобразований в работе сердца не выявлено (рис. 1, а3, с).

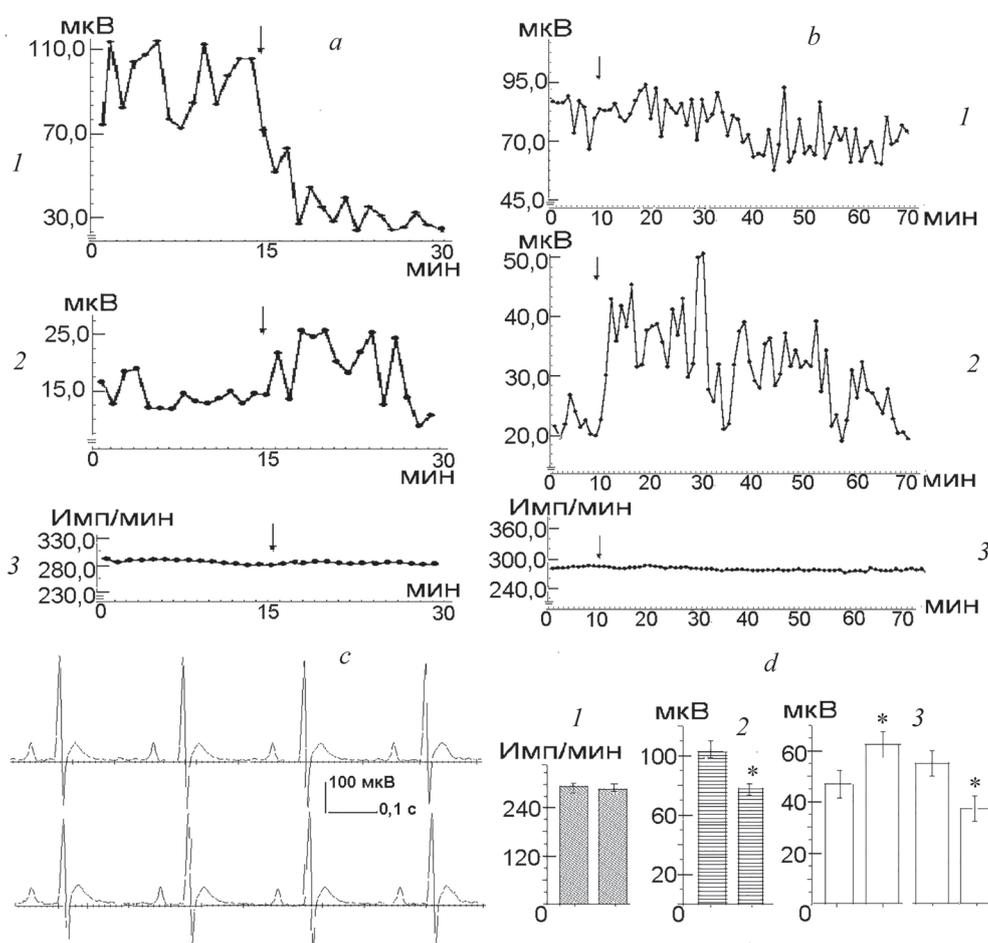


Рис. 1. Изменение после интрагастральной инфузии раствора глутамата (а), тартразина (б) амплитуды потенциалов гладких мышц пилорической части желудка (1), ободочной кишки (2), частоты сокращений сердца (3). Стрелки – момент введения раздражителя; с – ЭКГ до (вверху) и после (внизу) введения в желудок глутамата; d – данные серии опытов: 1 – частота сокращений сердца ($n = 11$), 2 – потенциалы гладких мышц желудка ($n = 11$), 3 – ободочной кишки, при пониженной фоновой активности (слева, $n = 9$) и повышенной (справа, $n = 10$). В каждой паре суммарных данных слева фоновая активность, справа – реакция на действие глутамата. $p < 0,05$

Fig. 1. Change after intragastric infusions of a solution glutamate (a), tartrazine (b) of amplitude of potentials of smooth muscles pylorus parts of a stomach (1), colon (2), frequencies of contractions of heart (3). Arrows – the moment of introduction stimulus; c – an electrocardiogram up to (above) and the after (in the bottom) introduction in a stomach glutamate; d – the given series of experiences: 1 – frequency of contractions of heart ($n = 11$), 2 – potentials of smooth muscles of a stomach ($n = 11$), 3 – colon, at the lowered background activity (at the left, $n = 9$) and increased (on the right, $n = 10$). In each pair the total data at the left background activity, on the right – reaction to action glutamate. $p < 0.05$

Судя по регистрируемому одновременно с сердечным ритмом потенциалам гладких мышц пилорической части желудка действие глутамата проявляется, в основном, в тормозных реакциях в виде снижения электрической активности (рис. 1, *a1, d2*). В ободочной кишке в одной части опытов на фоне относительно небольшой амплитуды ПГМ имеют место стимулирующие, в других, при более повышенной исходной активности, – ингибирующие ответы (рис. 1, *a2, d3*). Отмеченные эффекты наблюдались регулярно в большинстве проведенных экспериментов.

В этой серии опытов также установлено, что введение в желудок отдельно бензоата или тартразина не вызывает в большинстве опытов изменений ЧСС, но, как и в случае с глутаматом, регулярно влечет за собой повышение или понижение амплитуды ПГМ ЖКТ. Типичный пример подобных ответов представлен на рис. 1, *b*.

В аналогичных исследованиях после месячного кормления пищевыми добавками (бензоат натрия, тартразин, глутамат) получены иные результаты. На завершающем этапе, т. е. в острых, хотя и не во всех опытах, в 6 из 16 установлено снижение ЧСС, наступающее после инфузии глутамата в желудок (рис. 2, *a3, e1*). Изменения ПГМ желудка и кишки были подобны описанным выше (рис. 2, *a1, a2, e2, e3*).

В отличие от нормы под влиянием длительного применения добавок происходят изменения в ЭКГ, наблюдаемые в 40 % опытов. Как следует из записей рис. 2, *c* уже в фоновой активности зубец Т отличается большей обычной продолжительностью, процесс реполяризации ослаблен и волна Т сохраняется до начала зубца Р. На введение в желудок глутамата длительность этого сегмента ЭКГ увеличена, повышается амплитуда на пике потенциала.

Бензоат натрия, реже тартразин, также вызывал падение ЧСС в 5 из 15 опытов (рис. 2, *b, d*). Как и прежде в экспериментах на применение раздражителей выявлены ингибирующие – стимулирующие реакции гладких мышц (рис. 2, *b, l, 2*) независимо от того, возникают изменения ЧСС или нет, т. е. и в случаях, когда ритм сердца поддерживается на постоянном уровне.

Показатели эффектов бензоата, оцениваемых по значениям средней площади фрагментов ЭКГ, для волны Т в фоне (до введения в желудок) составляли 59 мкВ/с, на воздействие 75 и 61 мкВ/с, а для комплекса RST соответственно 127 мкВ/с (фон), 145 и 132 мкВ/с (реакция) (рис. 2, *d*). Кроме того, в начале понижения ЧСС, могут возникать фибрилляции, сопряженные с Т-волной, которые через несколько секунд прекращаются, после чего следует ослабление Р-волны (рис. 2, *d*).

По современным представлениям отклонения продолжительности, площади сегментов ЭКГ как в сторону повышения, так и понижения свидетельствуют о возможности серьезных расстройств в работе сердца, возникновения аритмии, фибрилляций, вплоть до остановки сердца [4; 5].

Глутамат, наряду с катехоламинами, входит в число основных медиаторов ЦНС, в том числе и ствола мозга, реализующих межнейронные связи в нервных сетях, и тем самым соответствующий контроль висцеральных и соматических функций. В естественных условиях и экстремальных ситуациях содержание медиаторов и гормонов может колебаться в широких пределах в нервных центрах и на периферии, предопределяя в значительной мере особенности протекания регуляторных реакций в организме. С учетом отмеченного обстоятельства последующие опыты преследовали цель изучить эффекты действия адреналина на анализируемые показатели в условиях раздражения применяемыми препаратами интероцепторов. Как оказалось, на фоне введенного в острых опытах в желудок крыс глутамата, инъекцируемый внутривенно адреналин (10 мкг) вызывает типичный для катехоламинов (КА), хотя и относительно слабый, кардиостимулирующий эффект, повышение ЧСС (рис. 3, *a3, a4, a5*). Такое действие адреналина зафиксировано во всех 11 опытах этой серии и сопровождалось в большинстве опытов четкими реакциями гладких мышц желудка и ободочной кишки (рис. 3, *a1, a2*). Четких изменений сегментов ЭКГ в этих ситуациях не выявлено.

Исходя из приведенных здесь фактов, в дальнейшей работе внимание обращено на особенности совместного действия изучаемых добавок на реакции адреналина непосредственно в остром опыте. Как установлено, на фоне введенных в желудок последовательно глутамата, бензоата, тартразина внутривенная инъекция адреналина имела своим следствием сравнительно интенсивное повышение ЧСС (рис. 3, *b3, b4, b5*), наряду, как и ранее, с изменениями ПГМ желудка и ободочной кишки (рис. 3, *b1, b2*). Примечательно, что в этих условиях эффекты используемых

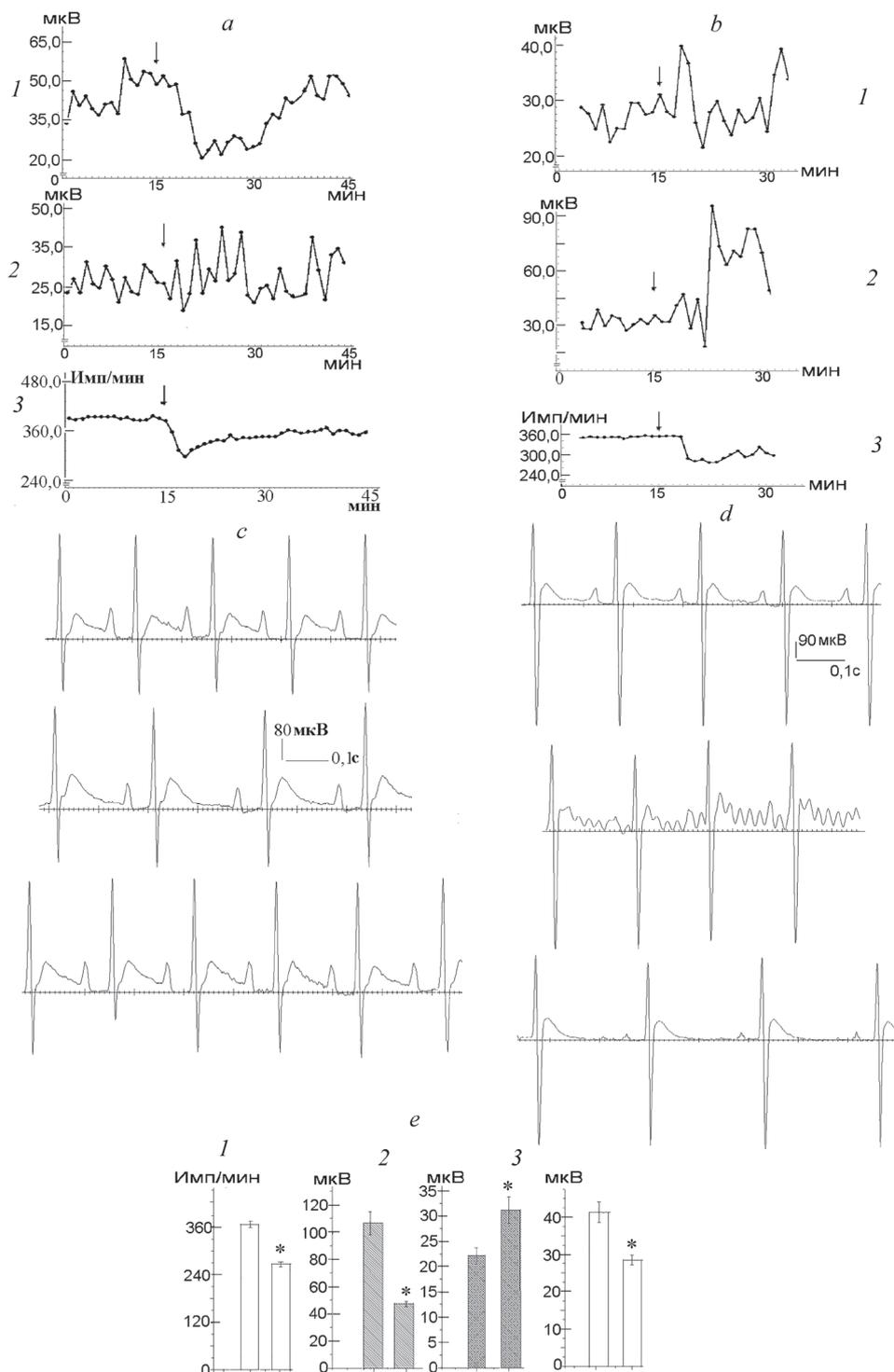


Рис. 2. Изменение амплитуды потенциалов гладких мышц желудка (1), ободочной кишки (2), частоты сердечных сокращений (3), а также ЭКГ (c, d) после интрагастрального введения в желудок глутамата (a, c), бензоата натрия (b, d) через месяц применения в качестве добавок глутамата, бензоата, тартразина. ЭКГ – фоновая активность (вверху), после (средняя часть) введения в желудок глутамата, бензоата и в последующее время действия (внизу); e – суммарные данные серий опытов: 1 – ЧСС, n = 6, 2 – ПГМ желудка (n = 10), 3 – ободочной кишки (n = 10). Остальные обозначения как на рис. 1. p < 0,05

Fig. 2. Change of amplitude of potentials of smooth muscles of a stomach (1), colon (2), frequencies of cardiac contractions (3), and also an electrocardiogram (c, d) the after intragastral introductions in a stomach glutamate (a, c), benzoate (b, d) in a month of application as additives glutamate, benzoate, tartrazine. An electrocardiogram – background activity (above), the after (an average part) introductions in a stomach glutamate, benzoate and during subsequent time of action (below); e – the total data of series of experiences: 1 – heart rate, n = 6, 2 – potentials of smooth muscles of a stomach (n = 10), 3 – colon (n = 10). Other designations as on Fig. 1. p < 0.05

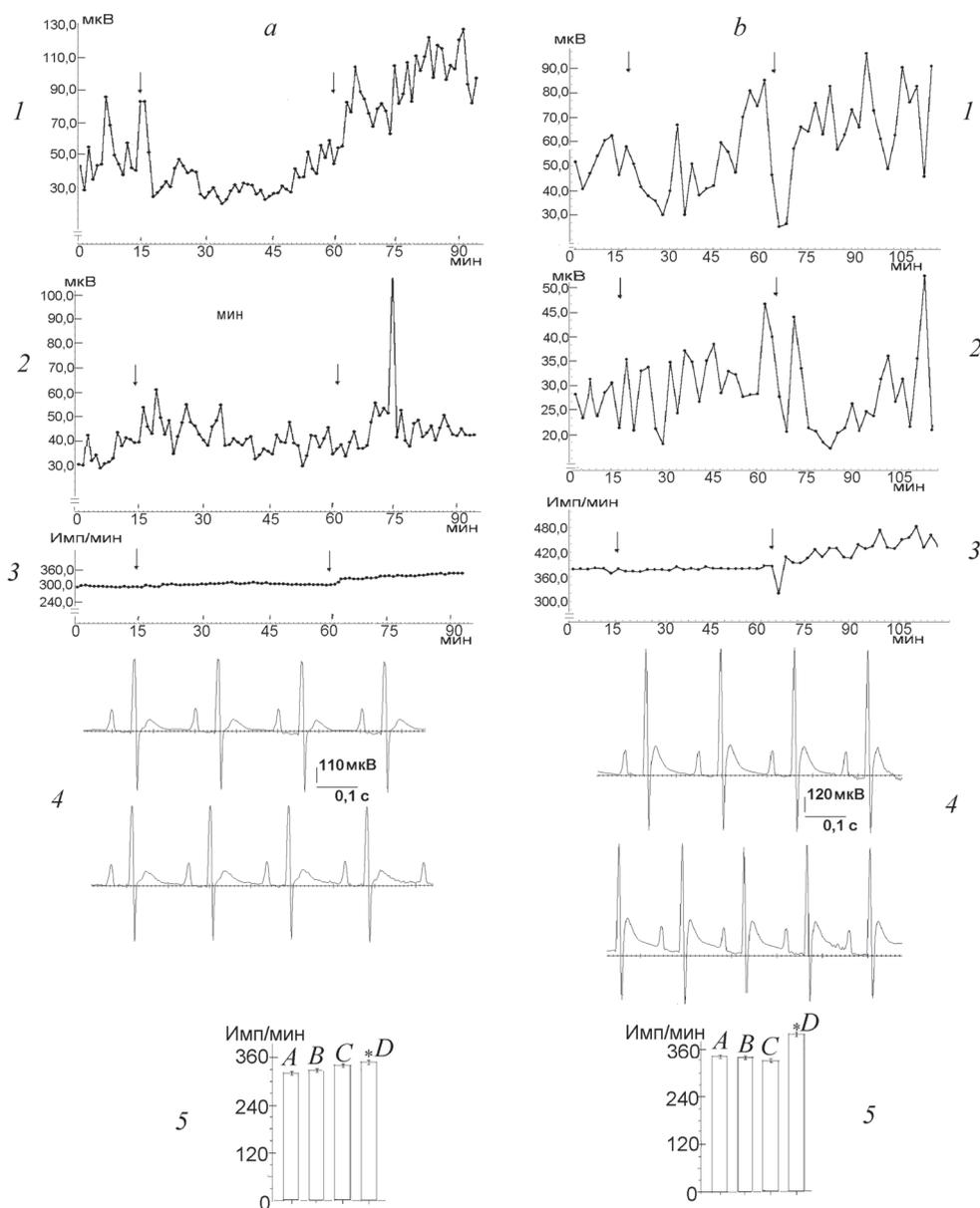


Рис. 3. Влияние внутривенного введения в остром опыте адреналина (10 мкг) после инфузии в желудок глутамата (*a*) и в комплексе глутамата, бензоата, тартразина (*b*) на ПГМ желудка (1), ободочной кишки (2), ЧСС (3), ЭКГ (4) – верхняя часть ЭКГ до, нижняя – после инъекции адреналина. Стрелками на рисунке указан момент введения вначале раздражителя, затем адреналина (справа); 5: *A* – средние значения ЧСС до воздействия, *B* – через 35 мин от начала введения раздражителей, *C* – через 1 мин после инъекции адреналина, *D* – через 35 мин, $5a - n = 11$, $5b - n = 7$. * – $p < 0,05$

Fig. 3. Influence of intravenous introduction in sharp experience of adrenaline (10 mkg) after infusion in a stomach glutamate (*a*) and in a complex glutamate, benzoate, tartrazine (*b*) on PSM a stomach (1), colon (2), heart rate (3), an electrocardiogram (4) – the top part of an electrocardiogram up to, bottom – after an injection of adrenaline. Arrows in figure specify the moment of introduction in the beginning stimulus, then adrenaline (on the right). 5: *A* – average values heart rate before influence, *B* – through 35 mines from the beginning of introduction stimulus, *C* – through 1 mines after an injection of adrenaline, *D* – in 35 minutes, $5a - n = 11$, $5b - n = 7$. * – $p < 0.05$

препаратов проявлялись в модификациях ЭКГ, в частности, уменьшением площади RS и повышением амплитуды и длительности сегмента Т (рис. 3, *b4*).

Неожиданными оказались результаты последующей серии экспериментов на животных, потреблявших в течение месяца пищевые добавки. Как оказалось, непосредственно в острых опытах, проведенных подобно предыдущим (рис. 3, *b*), внутривенная инъекция раствора адреналина, сопровождаясь чаще типичными по направленности, но интенсивными реакциями желудка

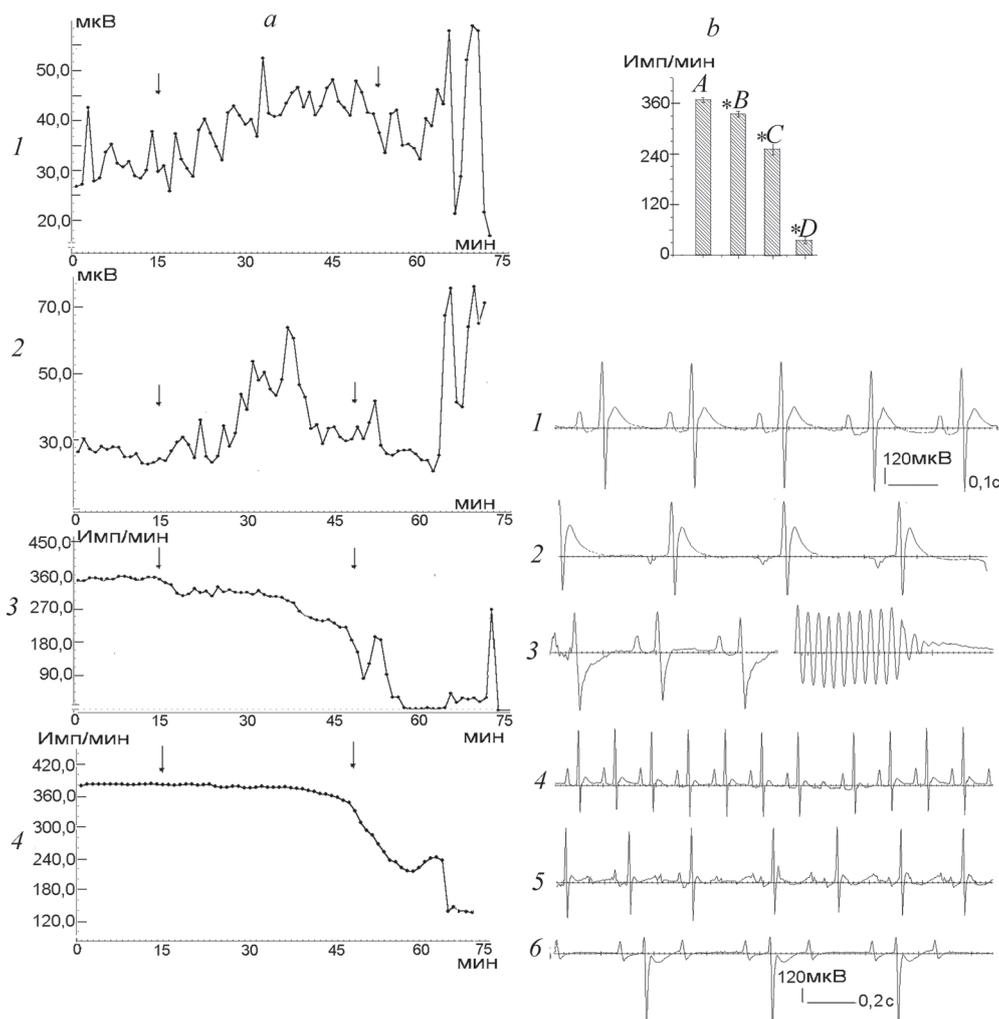


Рис. 4. Влияние предварительного кормления животных пищевыми добавками в течение месяца на изменения ПГМ желудка (*a1*), ободочной кишки (*a2*), ЧСС (*a3*, *a4*) при инфузии (стрелка) в желудок последовательно через 5 мин (*a*) глутамата, бензоата, тартразина и инъекции на этом фоне внутривенно (вторая стрелка) адреналина (10 мкг). *b* – ЧСС: *A* – фон, *B* – через 10 мин, *C* – 20 мин после отмеченных раздражителей, *D* – 10 мин после введения адреналина. Средние данные 12 опытов. *a3* и *a4* – варианты изменений ЧСС и соответствующие им фрагменты ЭКГ: *1*, *4* – до введения адреналина, *2*, *3* и *5*, *6* – последующие изменения (объяснения в тексте). * – $p < 0,05$

Fig. 4. Influence of preliminary feeding of animals by food additives within a month on changes PSM of a stomach (*a1*), colon (*a2*), heart rate (*a3*, *a4*) at infusions (arrow) in a stomach consistently through 5 minutes (*a*) glutamate, benzoate, tartrazine and injections on this background intravenously (the second arrow) adrenaline (10 mg). *b* – heart rate: *A* – background, *B* – through 10 minutes, *C* – 20 minutes after marked stimulus, *D* – 10 minutes after introduction of adrenaline. The average data of 12 experiences. *a3* and *a4* – variants of changes heart rate and fragments of an electrocardiogram corresponding to them: *1*, *4* – before introduction of adrenaline, *2*, *3* and *5*, *6* – the subsequent changes (explanations in the text). * – $p < 0.05$

и ободочной кишки (рис. 4, *a1*, *a2*), вызывала и вместе с тем хорошо выраженные относительно быстро развивающиеся кардиоингибирующие эффекты, завершаемые остановкой сердца в 12 из 16 проведенных опытах на крысах (рис. 4, *a3*, *a4*, *b*). Как правило, отмечалось постепенное падение ЧСС (с периодами тахикардии), увеличение площади зубца Т, а затем вслед за полной его редукцией, наступает инверсия зубца Р, падает амплитуда зубцов R и S, возникают фибрилляции (рис. 4, *b1*–*b3*). По количественной оценке фрагментов ЭКГ средняя площадь волны Т перед введением адреналина составляла 76 мкВ/с, после инъекции выросла до 88 мкВ/с, площадь RST была 114 мкВ/с, а под влиянием адреналина уменьшилась до 95 мкВ/с (рис. 4, *b1*, *b2*), несмотря на увеличение волны Т. Следовательно, общее ослабление комплекса RST связано с уменьшением площади сегмента RS. В других опытах в терминальную часть реакции значительно уменьшены

R и отсутствуют T зубцы ЭКГ, наряду с другими изменениями, отражающими электрическую активность миокарда (рис. 4, b4–b6).

Среди факторов, обуславливающих наступление событий, решающую, должно быть, роль играет длительное использование пищевых добавок: бензоата и тартразина, в меньшей степени – глутамата, что предопределяет наступление вместо стимулирующих кардиоингибиторных реакций, отражающих постепенно развивающиеся нарушения в нейро-гормональных механизмах регуляции деятельности сердца. Свидетельством тому служат полученные данные, согласно которым средняя площадь сегментов RST во всех опытах составляла в фоне (до действия раздражителей) контрольных животных 149 мкВ/с, волны T 82 мкВ/с, тогда как после месячного применения добавок – соответственно 80 мкВ/с ($p < 0,05$, $n = 17$) и 45 мкВ/с ($p < 0,05$, $n = 16$). Изменения длительности RST и T оказались незначительны и недостоверны.

Висцеральная афферентная сигнализация блуждающих нервов поступает в NTS (Nucleus Tractus Solitarius) по немиелинизированным волокнам (75–90 %), в основном, одиночного пучка, которые являются глутаминергическими, причем первый возбуждающий нейротрансмиттером представлен глутаматом, участвующим в реализации интероцептивных рефлексов [1; 6].

Ранее показано, что интрагастральная инфузия глутамата сопровождается возбуждением вагусных афферентов и рефлекторной активацией парасимпатических и симпатических волокон в блуждающих (на шее) и чревных нервах. Регистрируемые в мозге ответы на глутамат исчезают после поддиафрагмальной ваготомии [1]. Вероятно, в основном вагусные, в меньшей степени спинальные центростремительные проводники обуславливают установленные в наших исследованиях эффекты модуляции активности гладких мышц ЖКТ при действии глутамата на гастральные рецепторы. Как оказалось, потенциалы желудка в таких случаях угнетаются, а ободочной кишки – повышаются или понижаются. Тормозная реакция желудка связана, скорее всего, с рефлекторным возбуждением группы ингибирующих центробежных вагусных волокон и с медиацией нейроэффеторным звеном монооксида азота. Функционально такого рода рефлексы желудка свойственны для рецептивной релаксации – «воспринимающему торможению». Реакции гладких мышц ободочной кишки объясняются также нервными, недостаточно изученными влияниями с желудочных рецепторов, сопряженными с активацией бульбоспинальных нисходящих путей. Во всех опытах регулярно происходят изменения в текущей активности гладких мышц желудка и толстой кишки при действии на рецепторы желудка бензоата или тартразина. Поэтому можно предположить, что экзогенные пищевые добавки способны активировать прямо или опосредованно афферентные волокна ЖКТ. Примечательно, что одновременно регистрируемая с ПГМ желудка и ободочной кишки ЧСС не изменялась на действие в остром опыте добавок, используемых однократно как порознь, так и в комплексе. В большинстве случаев отсутствовали какие-либо значимые преобразования в сегментах ЭКГ.

Приведенные выше эффекты, касающиеся работы сердца по ряду показателей, оказались измененными после применения в течение месяца пищевой добавки, включающей глутамат, бензоат натрия, тартразин. Вслед за инфузией в желудок испытуемых компонентов в отдельности начинают выявляться тормозные рефлекторные реакции – понижение ЧСС, не наблюдаемые обычно в контроле изменения на записях ЭКГ зубца T и комплекса RST. Реакции гладких мышц желудка, кишки качественно не отличаются от таковых, регистрируемых ранее, до хронического эксперимента.

Исходя из известного существенного значения адренергических и глутаматэргических механизмов в регуляции функций сердца, заслуживают внимания, как нам представляется, выявленные в экспериментах эффекты преобразований традиционных кардиостимулирующих влияний адреналина на ингибирующие. Циркулирующие КА относят к важнейшим факторам, ответственным за различные функциональные расстройства, повреждения сердца, пертурбации метаболизма [7].

Литература содержит большую и разностороннюю информацию о случаях внезапной сердечной смерти (Sudden Cardiac Death, SCD), заметно увеличивающихся в последнее время. Многие из них четко коррелируют с повышением КА в крови, состояниями, когда повышена активность симпато-адреналовой системы, возникают вегетативные дисфункции в организме, нередко завершаемые остановкой работы сердца (стрессы, сердечная недостаточность, синдром Бругада,

катехоламинергическая полиморфная вентрикулярная тахикардия и пр.). Механизмы появления такого рода состояний, их отличия в зависимости от типа нарушений остаются во многом невыясненными [4; 8].

Согласно литературным данным, кардиальный «малый мозг» может независимо модулировать нервный контроль сердца и при повышении его возбудимости и подведении агонистов β -адренорецепторов вызвать атриальную фибрилляцию [9]. Так, норадреналин (НА) деполяризует у крыс мембраны нейронов в сердечных ганглиях [10].

Повышенный уровень циркулирующих КА в стрессовых ситуациях сказывается на функции непосредственно самого миокарда, служит важным условием пертурбаций метаболизма, увеличением оксидативного стресса в сердце и ослабления его сократительной активности, коронарного спазма, вентрикулярной аритмии с фатальным, нередко, исходом из-за повышения концентрации Ca^{2+} в кардиомиоцитах. Адреналин, НА, их аналоги в таких ситуациях, будучи токсичными, повреждают кардиомиоциты, в том числе и левого желудочка [4; 7–9]. Объективным показателем неблагоприятных событий служат ряд преобразований в ЭКГ [8; 9].

В наших опытах введение в желудок глутамата, а затем внутривенная инъекция адреналина приводят к незначительному повышению ЧСС. Компоненты ЭКГ не претерпевают значимых изменений. В то же время реакции гладких мышц хорошо выражены в таких ситуациях и чаще проявляются в стимулирующих ответах желудка и толстой кишки. Обращает на себя внимание тот факт, что бензоат натрия, тартразин, являющиеся синтетическими веществами, как и адекватный раздражитель глутамат постоянно изменяют рефлекторно тоническую активность желудка и кишки, в том числе и при действии адреналина на фоне этих соединений, применяемых раздельно или в комплексе. В последнем варианте экспериментов, при инъекции после интрагастральной инфузии трех добавок, адреналин вызывает четкие и продолжительные изменения как ПГМ, так и ритма сердца. Приведенные факты дают основание допустить возможность активирующего влияния данных экзогенных препаратов на рецепторы слизистой оболочки ЖКТ, особенно энтероэндокринных клеток, выделения нейрпептидов, гормонов и возбуждения тем самым окончаний афферентных волокон, а также действия на бульбарные центры многих пептидов, продуцируемых в ЖКТ, проникающих в мозг гуморальным путем.

Существенные модификации в отмеченных выше ответах на применение адреналина наступали после месячного потребления с пищей глутамата совместно с известными бензоатом, тартразином, т. е. были противоположными традиционным стимулирующим реакциям сердца. Введение на фоне данного комплекса на завершающем этапе в остром эксперименте адреналина приводило в большинстве опытов к остановке сердца и летальному исходу после постепенного падения ЧСС (аритмии, фибрилляции). Ответы желудка и кишки в таких ситуациях отличаются лишь количественно – более значительным повышением или понижением амплитуды ПГМ.

Вследствие длительного использования, пищевые добавки повышают проницаемость кишечного барьера как самостоятельно, так и за счет других местно образующихся метаболитов, медиаторов, в том числе, как обнаружено, и эндотоксина липополисахарид [11], проникают в общую циркуляцию крови вместе с многими энтеральными нейрпептидами, другими активными веществами, продуктами микроорганизмов, изменяя постепенно активность нервных центров. Особенно подвержены этим влияниям структуры продолговатого мозга, поскольку зона дна 4-го желудочка отличается повышенной сосудистой проницаемостью, а также кардиомиоциты и сеть сердечных нейронов. ЧСС после хронического применения добавок отражает, вероятно, эффекты их действия как в области сердца, так и на бульбарном уровне.

В итоге проведенных хронических исследований выявлены четкие изменения в кардиограмме, проявляющиеся в значительном падении средней амплитуды площади RST и T зубцов без существенных изменений длительности этих сегментов. В соответствии с принятым мнением эти факты служат предиктором последующих осложнений в работе сердца [4; 5; 8; 9]. На фоне приведенных изменений, отражающих исходное ослабление активности сердца, повышение в крови КА, стимулирует посредством β -адренорецепторов известный по [7] последующий ход деструктивных процессов в кардиомиоцитах.

В механизмах описанных выше кардиальных реакций, наряду с локальными, решающее значение имеют системные механизмы регуляции, базирующиеся на тесно взаимосвязанных цент-

ральных и периферических звеньях физиологических процессов. Прежде всего, после внутривенной инъекции раствора адреналина, инициирующего увеличение системного кровяного давления, происходит интенсивная активация барорецепторов. В таких ситуациях глутаминергические чувствительные бароафферентные волокна, вступающие в NTS, стимулируют вторичные нейроны ядра и после ряда переключений возбуждения ингибируют в ростральной вентролатеральной медулле нейроны с нисходящими в спинной мозг аксонами, связанными с преганглионарными нервными клетками. В итоге наступает снижение активности симпатических преганглионарных нейронов в спинном мозге и тем самым – адренергического кардиального выхода, ритма сердца и кровяного давления [4–6; 13]. В то же время в NTS активируется глутаминергический путь к кардиальным парасимпатическим нейронам *n. ambiguus*, усиливающим посредством NMDA-рецепторов возбуждающие влияния на них и ослабляя тем самым работу сердца. Ослабление кардиального сокращения ритма зависит также от торможения на уровне NTS GABA-ергических ингибирующих нейронов [6; 13], что освобождает парасимпатические нейроны от тормозного контроля.

В наших исследованиях следствием таких реакций в мозге является постепенное снижение после применения адреналина ЧСС, ослабление работы сердца. С понижением резистивности сосудов и бароафферентной сигнализации восстанавливается тоническая активность тормозных GABA-ергических нейронов, контролирующих вагусный выход NTS, в связи с чем наступает торможение вагусных эфферентных волокон и устраняется их тормозное действие на ритм сердца. Наряду с этим восстанавливается тонический симпатический контроль, поскольку на уровне продолговатого мозга угнетается активность нейронов, ингибирующих преганглионарные нейроны в спинном мозге. Тем самым автоматически осуществляется смена реципрокной функции возбуждающего и тормозящих контуров регуляции работы сердца.

В период измененного функционального состояния центральных и периферических кардиальных звеньев регуляции повышение по тем или иным причинам в организме КА может сопровождаться интенсивной активацией парасимпатических нейронов *n. ambiguus*, приводя к глубокому торможению сердечного ритма и SCD. В других более частых случаях может наступать хаотическая смена состояний – кардиоингибирующих на кардиостимулирующие реакции, что связано с возникновением ишемии, гипоксии, возбуждением многочисленных хеморецепторов сердца, каротидного синуса, других органов по причине гипоксии [14]. Означенные хеморецепторы вызывают торможение парасимпатического и стимулирующего кардиальную деятельность нервно-рефлекторного симпатического пути, что ведет к восстановлению ритма сердца, повышению кровяного давления. Последнее обстоятельство является предпосылкой активации парасимпатического кардиального рефлекса.

Заключение. Как следует из проведенных экспериментов, отклонения в деятельности сердца возникают большей частью после относительно длительного применения пищевых добавок, в результате чего постепенно изменяются сегменты ЭКГ, амплитуда которых и длительность отличаются от контрольных значений особенно при повышении в организме раздражителей, в частности, адреналина, имитирующего стрессовые ситуации. В опытах выявлен высокий уровень летальных исходов, обусловленных применением в качестве пищевых добавок глутамата, бензоата, тартразина. Полученные данные указывают на возможность неблагоприятных последствий использования с пищей неадекватных, синтезируемых добавок, особенно в период разного рода функциональных расстройств, отдельных заболеваний, сильных физических и психологических стрессов. В последние годы акцентируется внимание на фактах увеличения среди населения SCD [15], что коррелирует с известным ухудшением экологической обстановки, увеличением по числу и объему поступающих с пищей ксенобиотиков, химических препаратов и соединений, распада в окружающей среде бытовых отходов. Все эти факторы не могут не оказывать отрицательного влияния на функции организма, на нервную и сердечно-сосудистую системы в первую очередь.

Список использованных источников

1. New therapeutic strategy for amino acid medicine: effects of dietary glutamate on gut and brain function / A. Kitamura [et al.] // J. Pharm. Sci. – 2012. – Vol. 118, N 2. – P. 138–144. <https://doi.org/10.1254/jphs.11r06fm>

2. Mazzoli, R. The Neuroendocrinological Role of Microbial Glutamate and GABA Signaling / R. Mazzoli, E. Pessione // *Front. Microbiol.* – 2016. – Vol. 7. – P. 1934. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01934>
3. Азев, О. А. Программный продукт «Inputwin» для регистрации и анализа электрофизиологических данных / О. А. Азев, В. Е. Бурко, В. В. Солтанов // *Новости мед.-биол. наук.* – 2010. – Т. 2, № 4. – С. 152–155.
4. Cardiac innervation and sudden cardiac death / K. Fukuda [et al.] // *Circ. Res.* – 2015. – Vol. 116, N 12. – P. 2005–2019. <https://doi.org/10.1161/circresaha.116.304679>
5. Sudden death: Neurogenic causes, prediction, and prevention / N. Japundžić-Žigon [et al.] // *Eur. J. Prev. Cardiol.* – 2018. – Vol. 25, N 1. – P. 29–39. <https://doi.org/10.1177/2047487317736827>
6. Philbin, K. E. Clonidin, an alpha2-receptor agonist, diminishes GABAergic neurotransmission to cardiac vagal neurons in the nucleus ambiguus / K. E. Philbin, R. J. Bateman, D. Mendelowitz // *Brain Res.* – 2010. – Vol. 1347. – P. 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.06.001>
7. Different effects of prolonged β -adrenergic stimulation on heart and cerebral artery / E. Shin [et al.] // *Integr. Med. Res.* – 2014. – Vol. 3, N 4. – P. 204–210. <https://doi.org/10.1016/j.imr.2014.10.002>
8. Garcia-Elias, A. Ion Channel Disorder and Sudden Cardiac Death / A. Garcia-Elias, B. Benito // *Int. J. Mol. Sci.* – 2018. – Vol. 19, N 3. – P. 692. <https://doi.org/10.3390/ijms19030692>
9. Synaptic Plasticity in Cardiac Innervation and Its Potential Role in Atrial Fibrillation / J. L. Ashton [et al.] // *Front. Physiol.* – 2018. – Vol. 9. – P. 240. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00240>
10. Alpha1-adrenoreceptor-activated cation currents in neurones acutely isolated from rat cardiac parasympathetic ganglia / H. Ishibashi [et al.] // *J. Physiol.* – 2003. – Vol. 548, N 1. – P. 111–120. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2003.00111.x>
11. Солтанов, В. В. Роль кишечной микрофлоры в механизмах нервной регуляции вегетативных функций / В. В. Солтанов // *Новости мед.-биол. наук.* – 2015. – Т. 11, № 2. – С. 184–194.
12. Piper, P. W. Yeast superoxide dismutase mutants reveal a pro-oxidant action of weak organic acid food preservatives / P. W. Piper // *Free Radical Biol. and Med.* – 1999. – Vol. 27, N 11–12. – P. 1219–1227. [https://doi.org/10.1016/s0891-5849\(99\)00147-1](https://doi.org/10.1016/s0891-5849(99)00147-1)
13. Development of attenuated baroreflexes in obese Zucker rats coincides with impaired activation of nucleus tractus solitarius / P. S. Guimaraes [et al.] // *Am. J. Physiol. Reg., Integr. and Comp. Physiol.* – 2014. – Vol. 306, N 9. – P. R681–R692. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00537.2013>
14. Schultz, H. D. Mechanisms of carotid body chemoreflex dysfunction during heart failure / H. D. Schultz, N. J. Marcus, R. del Rio. // *Exp. Physiol.* – 2015. – Vol. 100, N 2. – P. 124–129. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2014.079517>
15. Backer, A. J. Adrenergic signaling in heart failure: a balance of toxic and protective effects / A. J. Backer // *Pflügers Arch.* – 2014. – Vol. 466, N 6. – P. 1139–1150. <https://doi.org/10.1007/s00424-014-1491-5>

References

1. Kitamura A., Tsurugizawa T., Uematsu A., Torii K., Uneyama H. New therapeutic strategy for amino acid medicine: effects of dietary glutamate on gut and brain function. *Journal Pharmacology Science*, 2012, vol. 118, no. 2, pp. 138–144. <https://doi.org/10.1254/jphs.11r06fm>
2. Mazzoli R., Pessione E. The Neuroendocrinological Role of Microbial Glutamate and GABA Signaling. *Frontiers in Microbiology*, 2016, vol. 7, pp. 1934. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01934>
3. Azev O. A., Burko V. E., Soltanov V. V. Program product “Inputwin” for registration and analysis of the electrophysiological data. *Novosti mediko-biologicheskikh nauk = News of Biomedical Sciences*, 2010, vol. 2, no. 4, pp. 152–155 (in Russian).
4. Fukuda K., Kanazawa H., Aizawa Y., Ardell J. L., Shivkumar K. Cardiac innervation and sudden cardiac death. *Circulation Research*, 2015, vol. 116, no. 12, pp. 2005–2019. <https://doi.org/10.1161/circresaha.116.304679>
5. Japundžić-Žigon N., Šarenac O., Lozić M., Vasić M., Tasić T., Bajić D., Kanjuh V., Murphy D. Sudden death: Neurogenic causes, prediction, and prevention. *European Journal of Preventive Cardiology*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 29–39. <https://doi.org/10.1177/2047487317736827>
6. Philbin K. E., Bateman R. J., Mendelowitz D. Clonidin, an alpha2-receptor agonist, diminishes GABAergic neurotransmission to cardiac vagal neurons in the nucleus ambiguus. *Brain Research*, 2010, vol. 1347, pp. 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.06.001>
7. Shin E., Ko K. S., Rhee B. D., Han J., Kim N. Different effects of prolonged β -adrenergic stimulation on heart and cerebral artery. *Integrative Medicine Research*, 2014, vol. 3, no. 4, pp. 204–210. <https://doi.org/10.1016/j.imr.2014.10.002>
8. Garcia-Elias A., Benito B. Ion Channel Disorder and Sudden Cardiac Death. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, vol. 19, no. 3, pp. 692. <https://doi.org/10.3390/ijms19030692>
9. Ashton J. L., Burton R. A. B., Bub G., Smaill B. H., Montgomery J. M. Synaptic Plasticity in Cardiac Innervation and Its Potential Role in Atrial Fibrillation. *Frontiers in Physiology*, 2018, vol. 9, pp. 240. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00240>
10. Ishibashi H., Umezumi M., Jang I. S., Ito Y., Akaike N. Alpha1-adrenoreceptor-activated cation currents in neurones acutely isolated from rat cardiac parasympathetic ganglia. *Journal of Physiology*, 2003, vol. 548, no. 1, pp. 111–120. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2003.00111.x>
11. Soltanov V. V. Role of the gut microflora in the mechanisms for nervous regulation of autonomic functions. *Novosti mediko-biologicheskikh nauk = News of Biomedical Sciences*, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 184–194 (in Russian).
12. Piper P. W. Yeast superoxide dismutase mutants reveal a pro-oxidant action of weak organic acid food preservatives. *Free Radical Biology and Medicine*, 1999, vol. 27, no. 11–12, pp. 1219–1227. [https://doi.org/10.1016/s0891-5849\(99\)00147-1](https://doi.org/10.1016/s0891-5849(99)00147-1)
13. Guimaraes P. S., Huber D. A., Compagnole-Santos M. J., Schreihöfer A. M. Development of attenuated baroreflexes in obese Zucker rats coincides with impaired activation of nucleus tractus solitarius. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2014, vol. 306, no. 9, pp. R681–R692. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00537.2013>

14. Schultz H. D., Marcus N. J., del Rio R. Mechanisms of carotid body chemoreflex dysfunction during heart failure. *Experimental Physiology*, 2015, vol. 100, no. 2, pp. 124–129. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2014.079517>

15. Backer A. J. Adrenergic signaling in heart failure: a balance of toxic and protective effects. *Pflügers Archiv – European Journal of Physiology*, 2014, vol. 466, no. 6, pp. 1139–1150. <https://doi.org/10.1007/s00424-014-1491-5>

Информация об авторах

Солтанов Владимир Всеволодович – член-корреспондент, д-р биол. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: biblio@fizio.bas-net.by.

Комаровская Людмила Михайловна – науч. сотрудник. Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: biblio@fizio.bas-net.by.

Information about the authors

Soltanov Vladimir Vsevolodovich – Corresponding Member, D. Sc. (Biology), Professor, Chief researcher. Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: biblio@fizio.bas-net.by.

Komarovskaya Ludmila Mikhailovna – Researcher. Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: biblio@fizio.bas-net.by.

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

УДК 617.7
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-343-349>

Поступило в редакцию 20.05.2019
Received 20.05.2019

Г. Р. Семак, В. А. Захарова, С. К. Клецкий, Т. А. Летковская, И. Ю. Жерко

Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь

ИММУНОГИСТОХИМИЧЕСКИЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИАЛУРОНОВОЙ КИСЛОТЫ В ЛЕЧЕНИИ КЕРАТОПАТИЙ

(Представлено членом-корреспондентом Н. С. Сердюченко)

Аннотация. Представлен анализ изменений экспрессии CD44 и MMP9 на фоне терапии кератопатий в исходе воспалительных заболеваний роговицы с использованием инъекционной формы гиалуроновой кислоты.

Ключевые слова: гиалуроновая кислота, регенерация, дистрофии роговицы, иммуногистохимия

Для цитирования: Иммуногистохимические доказательства эффективности гиалуроновой кислоты в лечении кератопатий / Г. Р. Семак [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 343–349. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-343-349>

Galina R. Semak, Viktoriya A. Zakharova, Semen K. Kletsy, Tatiana A. Letkovskaya, Irina Yu. Zherko

Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus

IMMUNOHISTOCHEMICAL PROOFS OF THE EFFICIENCY OF HYALURONIC ACID IN KERATOPATHY TREATMENT

(Communicated by Corresponding Member Nikolai S. Serduchenko)

Abstract. An analysis of changes in the CD44 and MMP9 expression during the keratopathy after corneal inflammatory diseases treatment with injected hyaluronic acid is presented.

Keywords: hyaluronic acid, dry eye disease, regeneration, corneal dystrophy, immunohistochemistry

For citation: Semak G. R., Zakharova V. A., Kletsy S. K., Letkovskaya T. A., Zherko I. Yu. Immunohistochemical proofs of the efficiency of hyaluronic acid in keratopathy treatment. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 343–349 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-343-349>

Заболевания роговицы широко распространены в европейской популяции – 92,13 % [1]. В то же время они являются основной причиной развития первичной инвалидности от заболеваний органа зрения. Кератопатии склонны к хроническому течению и требуют проведения повторных длительных курсов терапии.

В клинических исследованиях нами была доказана эффективность субконъюнктивального введения низкомолекулярного натрия гиалуроната в лечении хронических дистрофических заболеваний роговицы (ХДЗР) [2; 3]. Было показано, что гиалуроновая кислота молекулярной массой 500–700 кДа положительно влияет на течение как болезни сухого глаза, так и самой кератопатии. Увеличивается слезопродукция, повышается стабильность слезной пленки, уменьшается толщина роговицы, разрешаются помутнения, уменьшается количество конъюнктивальных сосудов (рис. 1).

Следующим шагом стало определение молекулярных механизмов полученных эффектов.

Цель исследования – определить эффективность терапии ХДЗР в исходе кератитов с применением низкомолекулярной гиалуроновой кислоты путем комплексного анализа характера экспрессии биомолекулярных маркеров в материале эксплантов роговиц.

Материалы и методы исследования. Исследование выполнено на базе кафедр офтальмологии и патологической анатомии учреждения образования «Белорусский государственный медицинский университет». Изучен проспективный материал эксплантов роговиц обратившихся в 2017–2018 гг. для обследования и последующего лечения 22 пациентов с кератопатиями в исходе кератитов.

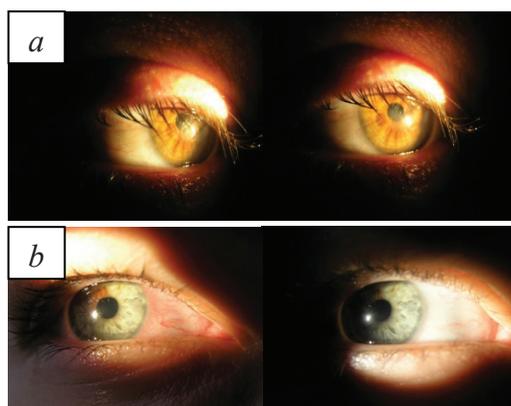


Рис. 1. Биомикроскопическая картина переднего отрезка глаза до и после лечения: *a* – разрешение очага помутнения в оптической зоне роговицы; *b* – уменьшение количества конъюнктивальных сосудов

Fig. 1. Biomicroscopic picture of the anterior segment of the eye before and after treatment: *a* – resolution of the clouding site in the optical zone of the cornea; *b* – decrease in the number of conjunctival vessels

Группы исследования и сравнения были представлены материалом эксплантов роговиц пациентов с кератопатиями в исходе кератитов, терапия которых включала дополнительное применение гиалуроновой кислоты (ГК+) и проводилась по стандартным протоколам (ГК–) соответственно (табл. 1). Перед началом обследования и лечения все пациенты подписали информированное согласие о включении в исследование.

Т а б л и ц а 1. Структура материала для анализа морфологических и иммуногистохимических (ИГХ) признаков дисков роговиц пациентов с кератопатиями в исходе кератитов

Table 1. Material structure for the analysis of morphological and immunohistochemical (IHC) signs of the corneal discs of patients with keratopathy in the keratitis outcome

Нозологическая форма Nosological form	Число случаев Number of cases	Число полей зрения (×40) Number of visual fields (×40)
Группа контроля	6	36
Кератиты («+» гиалуроновая кислота)	11	66
Кератиты («–» гиалуроновая кислота)	14	84
Всего	31	186

Критериями включения в исследование явились время после излечения острого кератита не менее 2 лет, неэффективность инстилляционной терапии; критериями исключения – наличие острого воспалительного процесса, глаукомы или офтальмогипертензии.

Клинико-лабораторное обследование включало визометрию, биомикроскопию, тонометрию, тест Ширмера I, LIPCOF-тест, определение времени разрыва слезной пленки, оптическую когерентную томографию переднего отрезка глазного яблока.

Исследуемые группы были сопоставимы по основным клинико-лабораторным и морфологическим показателям.

Для изучения морфологических особенностей кератопатий и эффекта проводимой терапии были использованы следующие модификации морфологического метода: окрашивание гистологических препаратов гематоксилином и эозином, иммуногистохимический метод (ИГХМ) с использованием маркеров CD44, MMP9.

Для приготовления гистологических препаратов из парафиновых блоков делались срезы толщиной 2,5 мкм, которые депарафинировались в ксилоле, обезжировались в спиртах возрастающей концентрации, окрашивались гематоксилином-эозином и с использованием ИГХМ. При исследовании патологии роговицы с использованием светового оптического микроскопа Leica оценивался характер морфологических изменений, согласно разработанному бланку оценки. С целью анализа характера экспрессии биомолекулярных маркеров выполнено ИГХ

окрашивание с использованием первичных моноклональных антител к CD44, MMP9. В качестве визуализирующей системы использовали комплекс вторичных антител EnVision фирмы DAKO, в качестве хромогена – диаминобензидин (ДАБ). Позитивный контроль – ткани и органы, рекомендованные производителем, негативный – исключение первичного антитела. Срезы промывали проточной водой, докрашивали гематоксилином Майера, заключали в канадский бальзам. Характер экспрессии ИГХ маркеров представлен в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Характер экспрессии основных ИГХ маркеров
Table 2. Character of expression of main immunohistochemical markers

ИГХ маркер Immunohistochemical marker	Характер экспрессии Expression character
CD44	Гомогенное окрашивание мембран и/или цитоплазмы эпителиальных клеток (преимущественно базальных слоев) и/или стромальных клеток в коричневый цвет различной интенсивности (от светло- до темно-коричневого)
MMP9	Цитоплазматическое окрашивание эпителия роговицы, лейкоцитов, стромальных клеток в коричневый цвет различной интенсивности

Для морфометрического исследования микропрепараты фотографировали в 6 случайных непересекающихся полях зрения (объектив 40).

ИГХ реакция с CD44, MMP9 в материале оценивалась отдельно в эпителии, кератоцитах и эндотелии роговицы с использованием программного обеспечения для морфометрии WCIF ImageJ и Aperio Image Scope v.8.0.39.1059.

Статистический анализ данных проводился с использованием программного обеспечения Statistica 10.0. Полученные результаты обработаны статистически с вычислением медианы (Me), моды (Mo), межквартильного размаха (МКР – 25 % и 75 % процентиля) и 95 %-ного доверительного интервалов (ДИ), максимального и минимального значения.

Для оценки характера распределения полученных данных использовался критерий Шапиро–Уилка (W). Уровень статистической значимости устанавливался $p < 0,05$. Сравнение независимых выборок по количественным признакам проводилось с использованием дисперсионного анализа непараметрических данных ANOVA и определением критериев Краскела–Уоллиса (H -критерий) для трех и более выборок и Манна–Уитни (U -критерий) с целью парного сравнения выборок. Корреляционные взаимосвязи между анализируемыми признаками вычислялись с использованием рангового коэффициента корреляции непараметрических данных Спирмена (ρ).

Результаты и их обсуждение. В рамках проведенного исследования особенности экспрессии CD44 и MMP9 при светооптической оценке гистологических препаратов заключались в увеличении экспрессии данных маркеров в случаях ХДЗР в исходе кератитов с выраженными признаками альтерации эпителия роговицы, а также выраженности воспаления и неопластического процесса в строме. Результаты взаимосвязи экспрессии CD44 и MMP9 между собой представлены в табл. 3.

Анализ экспрессии CD44. Среди рецепторов ГК CD44 является наиболее распространенным. Этот трансмембранный рецептор I типа способен связываться с ГК любой длины и молекулярной массы (кроме фрагментов меньших, чем 6 сахаридов). Цитоплазматический домен рецептора используется для связывания с ГК, образования и взаимосвязи с компонентами перичеселлюлярного матрикса и эндцитоза фрагментов ГК. Внутрицитоплазматический домен стандартного CD44 способен транслоцироваться в ядро и самостоятельно модулировать функции клеток. CD44 также является молекулой клеточной адгезии, доказано увеличение ее экспрессии при альтерации и воспалении, в том числе ткани роговицы [4–6].

В исследованных случаях ХДЗР в исходе кератитов экспрессия CD44 выявлялась в ткани роговицы в виде мембранного окрашивания с преобладанием слабой и умеренной экспрессии в базальном и парабазальном слоях эпителия и очагово в кератоцитах под Боуменовской мембраной и эндотелии сосудов в очагах неопластического процесса (рис. 2, а). Экспланты роговиц в группе контроля характеризовались негативным окрашиванием или базальной слабо выраженной экспрессией CD44 в эпителии роговицы и негативным окрашиванием в кератоцитах и эндотелии (рис. 2, б).

Т а б л и ц а 3. Корреляционный анализ экспрессии CD44 и MMP9 в ткани эксплантов роговиц пациентов с ХДЗР в исходе кератитов

Table 3. Correlation analysis of CD44 and MMP9 expression in the tissue of corneal explants of patients with chronic dystrophic corneal diseases in the keratitis outcome

Признак Sign	КЭ CD44 ER CD44	Использование ГК Use of hyaluronic acid
КЭ CD44		$\rho = -0,091$
Позитивность MMP9 в эпителии	$\rho = 0,514^*$	$\rho = 0,629^*$
Индекс общей экспрессии MMP9 в эпителии	$\rho = -0,728^*$	$\rho = -0,505^*$
Индекс экспрессии MMP9 в иммунопозитивных участках эпителиа	$\rho = -0,752^*$	$\rho = -0,352^*$
Позитивность MMP9 в строме	$\rho = 0,386^*$	$\rho = 0,394^*$
Индекс общей интенсивности MMP9 в строме	$\rho = -0,500^*$	$\rho = -0,321$
Индекс интенсивности MMP9 в иммунопозитивных участках стромы	$\rho = -0,290$	$\rho = -0,080$

П р и м е ч а н и е. * – различия достоверны при $p < 0,05$; КЭ – коэффициент экспрессии.

N o t e. * – the differences are reliable at $p < 0,05$; ER – expression ratio.

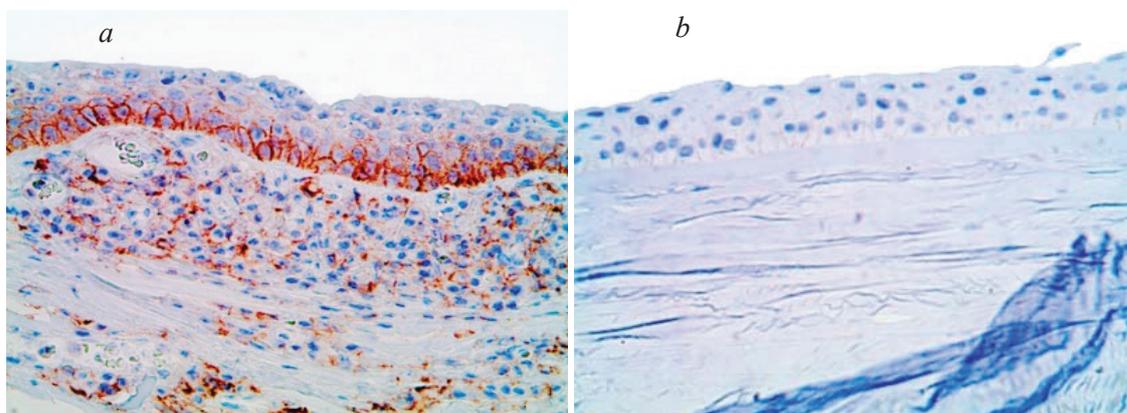


Рис. 2. Экспрессия CD44 в эпителии эксплантов роговиц в группе контроля (a) и в группах пациентов с ХДЗР в исходе кератитов (b). ИГХМ. Хромоген – диаминобензидин. Контрокрасивание – гематоксилином Майера. Объектив 40

Fig. 2. Expression of CD44 in the epithelium of corneal explants in control group (a) and in groups of patients with chronic dystrophic corneal diseases in the keratitis outcome (b). Immunohistochemical method. Chromogene – diaminobenzidine. Back-tracking – Meyer's hematoxylin. Objective 40

В рамках анализа эффективности применения натрия гиалуроната в дополнение к стандартному протоколу лечения ХДЗР в исходе кератитов выявлена тенденция к снижению экспрессии CD44 в группе ГК+ до сопоставимых уровней его экспрессии с группой контроля, однако различия между опытными группами в зависимости от типа проводимой терапии были статистически незначимы (рис. 3).

Также отсутствовали значимые различия в экспрессии CD44 между группами ХДЗР в исходе кератитов и контрольной группой. Учитывая литературные данные о наибольшей экспрессии CD44 в острой фазе воспаления на фоне максимальных альтеративных изменений эпителия роговицы и постепенном снижении уровней его экспрессии с течением времени, выявленные особенности экспрессии CD44 можно объяснить более быстрыми темпами купирования воспаления и последующей регенерации эпителия роговицы на фоне субконъюнктивального введения натрия гиалуроната.

Анализ экспрессии MMP9. Основным звеном патогенеза болезни сухого глаза является гиперосмолярность слезы, которая приводит к активации провоспалительных цитокинов в эпителии роговицы, в том числе и MMP9 [7]. Также показано, что экзогенное введение некоторых полисахаридов может увеличивать продукцию данного цитокина в эпителии, участвуя в дальнейшем потенцировании воспаления [8]. Клинически диагностируемые стромальные помутнения роговицы развиваются в результате прогрессирующего отека, дезорганизации коллагеновых волокон,

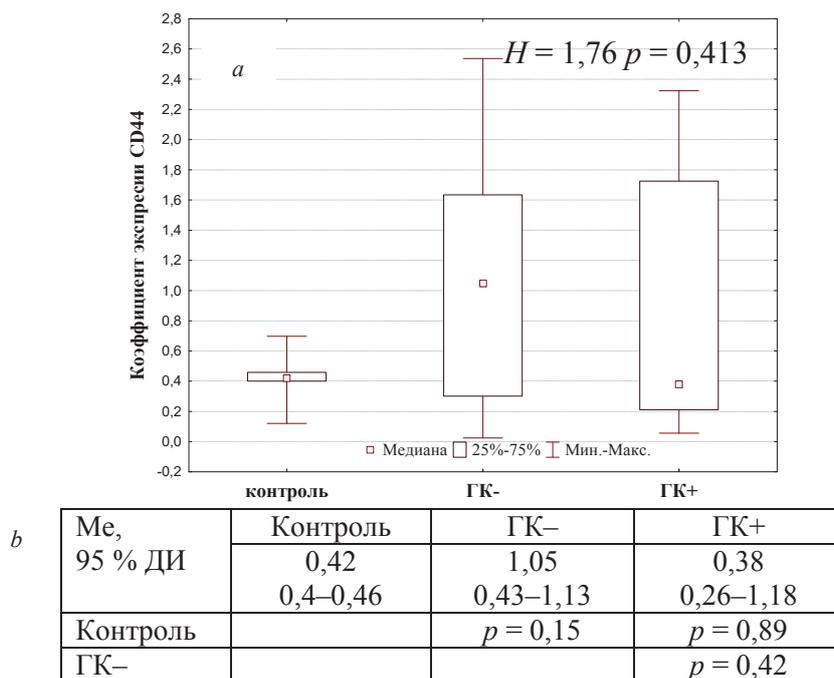


Рис. 3. Дисперсионный анализ коэффициентов экспрессии CD44 в эпителии эксплантов роговиц: *a* – критерий Краскела–Уоллиса; *b* – критерий Манна–Уитни

Fig. 3. Dispersion analysis of CD44 expression in the epithelium of corneal explants: *a* – Kruskal–Wallis test; *b* – Mann–Whitney test

бласттрансформации фибробластов в миофибробласты и синтеза ими нетипичных для роговицы коллагена 2 и 3 типов [9]. MMP9 в строме способна активировать фибробласты, потенцировать их подвижность без трансформации в контрактильный тип и увеличивать синтез коллагена 1 типа [10].

В исследованных случаях ХДЗР в исходе кератитов экспрессия MMP9 выявлялась в ткани роговицы в виде цитоплазматического, преимущественно перинуклеарного, окрашивания эпителия с преобладанием в базальных и парабазальных слоях и стромы в кератоцитах и лейкоцитах с выраженной экспрессией в очагах неангиогенеза. Экспланты роговиц в группе контроля характеризовались негативным окрашиванием к MMP9 (рис. 4).

В рамках анализа эффективности применения натрия гиалуроната в дополнение к стандартному протоколу лечения ХДЗР в исходе кератитов выявлены статистически значимо более высокие показатели экспрессии MMP9 в ткани эксплантов роговиц в группе с применением натрия гиалуроната (рис. 5), что может свидетельствовать об активации процессов ремоделиро-

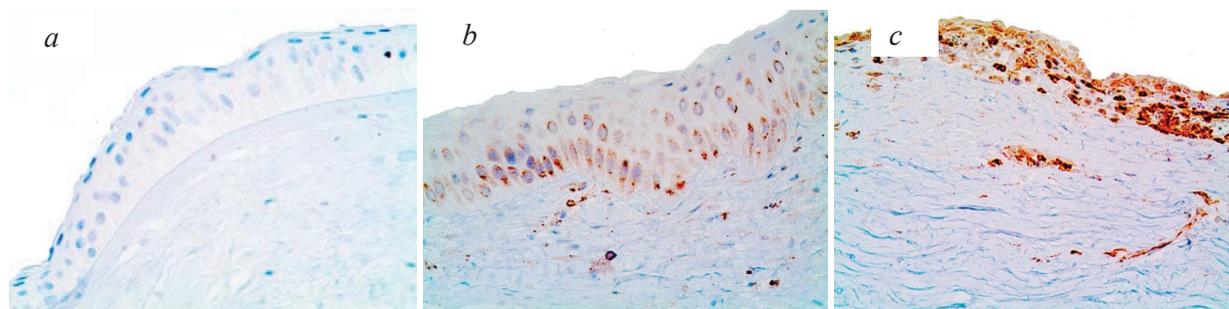


Рис. 4. Экспрессия MMP9 в ткани эксплантов роговиц в группе контроля (*a*) и в группах пациентов с ХДЗР в исходе кератитов (*b, c*). ИГХМ. Хромоген – диаминобензидин. Контрокрасивание – гематоксилином Майера. Объектив 40

Fig. 4. Expression of MMP9 in the tissues of corneal explants in control group (*a*) and in groups of patients with HCl in the keratitis outcome (*b, c*). Immunohistochemical method. Chromogene – diaminobenzidine. Backtracking – Meyer’s hematoxylin. Objective 40

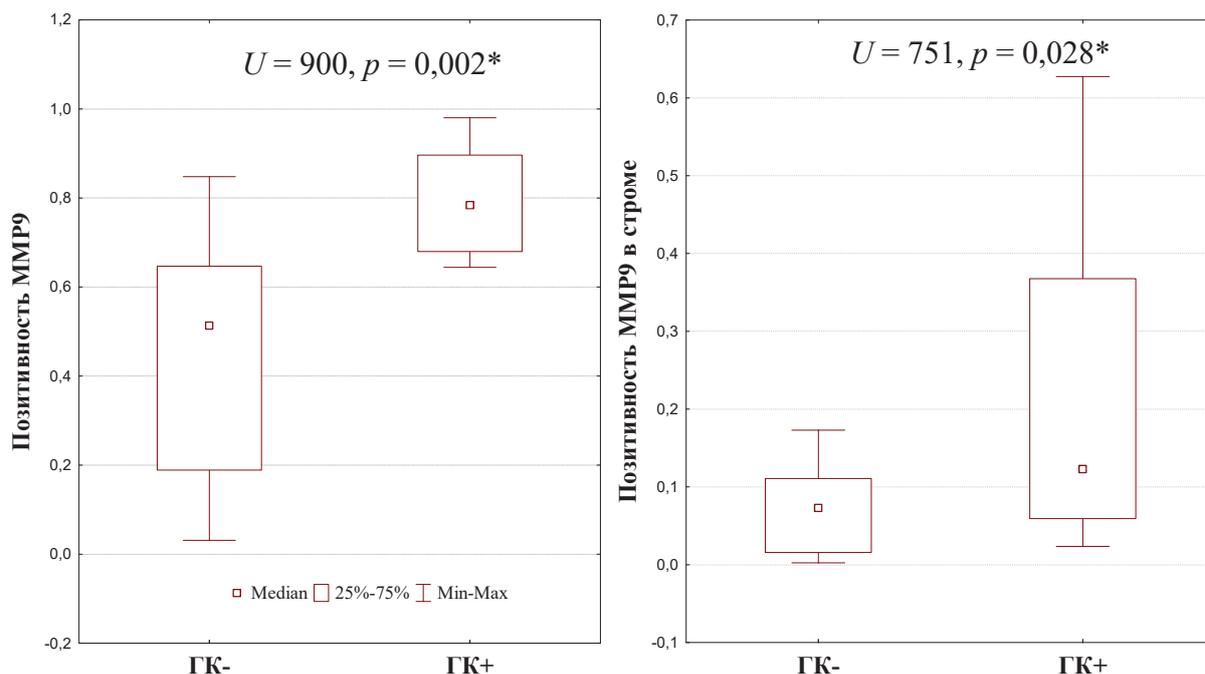


Рис. 5. Дисперсионный анализ экспрессии MMP9 в эпителии и строме эксплантов роговиц пациентов с ХДЗР в исходе кератитов

Fig. 5. Dispersion analysis of MMP9 expression in the epithelium and stroma of corneal explants of patients with chronic dystrophic corneal diseases in the keratitis outcome

вания стромы поврежденной роговицы, что клинически проявлялось увеличением прозрачности роговицы.

Заключение. В рамках проведенного исследования получено морфологическое обоснование клинического эффекта субконъюнктивального введения натрия гиалуроната при лечении коморбидной болезни сухого глаза. А именно, выявлена тенденция к снижению экспрессии CD44 в группе пациентов с кератитами при применении натрия гиалуроната в дополнение к стандартному протоколу лечения и сопоставимых уровнях его экспрессии с группой контроля, что опосредованно может доказывать более высокие темпы регенерации роговицы при применении натрия гиалуроната со снижением экспрессии данного маркера к концу периода наблюдения. При этом значимых различий в экспрессии CD44 в зависимости от локализации в центральной части и периферии диска роговицы не выявлено. Экспрессия провоспалительной MMP9 была взаимосвязана с таковой CD44, признаками альтерации/воспаления и выраженности неоваскуляризации в ткани роговицы. Также отмечены значимо более высокие уровни эпителиальной и стромальной экспрессии MMP9 в группе пациентов с кератитами при применении натрия гиалуроната в дополнение к стандартному протоколу лечения, что может свидетельствовать об активации процессов ремоделирования экстрацеллюлярного матрикса поврежденной роговицы с клиническим эффектом в виде увеличения прозрачности роговицы.

Список использованных источников

1. Ezra, D. B. Bлефарит и Конъюнктивит. Guidelines for Diagnosis and Treatment / D. B. Ezra. – Int. Ocular Inflammation Society, 2006. – P. 10–18.
2. Семак, Г. Р. Клинические результаты комплексного лечения кератопатий в исходе воспалительных заболеваний переднего отрезка глазного яблока с использованием инъекционной формы гиалурононовой кислоты / Г. Р. Семак, И. Ю. Жерко // Медицинский журнал. – 2019. – № 1. – С. 97–100.
3. Семак, Г. Р. Новый подход к лечению хронических дистрофических заболеваний роговицы / Г. Р. Семак, А. В. Людчик, И. Ю. Жерко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 719–724. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-719-724>

4. Hyaluronan enhances contraction of collagen by smooth muscle cells and adventitial fibroblasts: role of CD44 and implications for constrictive remodeling / J. A. Travis [et al.] // *Circ. Res.* – 2001. – Vol. 88, N 1. – P. 77–83. <https://doi.org/10.1161/01.res.88.1.77>
5. Hyaluronan enhances bone marrow cell therapy for myocardial repair after infarction / C.-H. Chen [et al.] // *Mol. Ther.* – 2013. – Vol. 21, N 3. – P. 670–679. <https://doi.org/10.1038/mt.2012.268>
6. Selective matrix (hyaluronan) interaction with CD44 and RhoGTPase signaling promotes keratinocyte functions and overcomes age-related epidermal dysfunction / L. Y. W. Bour-Guignon [et al.] // *J. Dermatol. Sci.* – 2013. – Vol. 72, N 1. – P. 32–44. <https://doi.org/10.1016/j.jdermsci.2013.05.003>
7. TFOS DEWS II Introduction // *The Ocular Surface*. 2017 [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.theocularsurfacejournal.com/article/S1542>. – Date of access: 20.07.2017.
8. Hyaluronan, heterogeneity, and healing: the effects of ultrapure hyaluronan of defined molecular size on the repair of full-thickness pig skin wounds / F. Arnold [et al.] // *Wound Repair Regen.* – 1995. – Vol. 3, N 3. – P. 299–310. <https://doi.org/10.1046/j.1524-475x.1995.30310.x>
9. The Corneal Basement Membranes and Stromal Fibrosis / C. S. Medeiros [et al.] // *Invest Ophthalmol. Vis. Sci.* – 2018. – Vol. 59, N 10. – P. 4044–4053. <https://doi.org/10.1167/iiov.18-24428>
10. Fibroblast-fibronectin patterning and network formation in 3D fibrin matrices / M. Miron-Mendoza [et al.] // *Matrix Biol.* – 2017. – Vol. 64. – P. 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.matbio.2017.06.001>

References

1. Ezra D. B. *Blefaritis and Conjunctivitis. Guidelines for Diagnosis and Treatment*. International Ocular Inflammation Society, 2006, pp. 10–18.
2. Semak G. R., Gerco I. Y. Clinical results of complex treatment of keratopathies in the outcome of inflammatory diseases of the anterior segment of the eyeball using the injectable form of hyaluronic acid. *Meditsinskii zhurnal = Medical Journal*, 2019, no. 1, pp. 97–100 (in Russian).
3. Semak G. R., Lyudchik A. V., Zherko I. Yu. New approach to treating chronic dystrophic cornea diseases. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 719–724 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-719-724>
4. Travis J. A., Hughes M. G., Wong J. M., Wagner W. D., Geary R. L. Hyaluronan enhances contraction of collagen by smooth muscle cells and adventitial fibroblasts: role of CD44 and implications for constrictive remodeling. *Circulation Research*, 2001, vol. 88, no. 1, pp. 77–83. <https://doi.org/10.1161/01.res.88.1.77>
5. Chen C.-H., Wang S.-S., Wei E. I., Chu T.-Y., Hsieh P. C. H. Hyaluronan enhances bone marrow cell therapy for myocardial repair after infarction. *Molecular Therapy*, 2013, vol. 21, no. 3, pp. 670–679. <https://doi.org/10.1038/mt.2012.268>
6. Bourguignon L. Y. W., Wong G., Xia W., Man M.-Q., Holleran W. M., Elias P. M. Selective matrix (hyaluronan) interaction with CD44 and RhoGTPase signaling promotes keratinocyte functions and overcomes age-related epidermal dysfunction. *Journal of Dermatological Science*, 2013, vol. 72, no. 1, pp. 32–44. <https://doi.org/10.1016/j.jdermsci.2013.05.003>
7. TFOS DEWS II Introduction. *The Ocular Surface*. 2017. Available at: <http://www.theocularsurfacejournal.com/article/S1542> (accessed 20 July 2018).
8. Arnold F., Jia C., He C., Cherry G. W., Carbow B., Meyer-Ingold W., Bader D., West D. C. Hyaluronan, heterogeneity, and healing: the effects of ultrapure hyaluronan of defined molecular size on the repair of full-thickness pig skin wounds. *Wound Repair Regen*, 1995, vol. 3, no. 3, pp. 299–310. <https://doi.org/10.1046/j.1524-475x.1995.30310.x>
9. Medeiros C. S., Marino G. K., Santhiago M. R., Wilson S. E. The Corneal Basement Membranes and Stromal Fibrosis. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2018, vol. 59, no. 10, pp. 4044–4053. <https://doi.org/10.1167/iiov.18-24428>
10. Miron-Mendoza M., Graham E., Manohar S., Petroll W. M. Fibroblast-fibronectin patterning and network formation in 3D fibrin matrices. *Matrix Biology*, 2017, vol. 64, pp. 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.matbio.2017.06.001>

Информация об авторах

Семак Галина Романовна – канд. мед. наук, доцент. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, Минск, Республика Беларусь). E-mail: semakgalina@mail.ru.

Захарова Виктория Алексеевна – канд. мед. наук, доцент. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zakharava.vikt@gmail.com.

Клецкий Семён Кивович – канд. мед. наук, доцент. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, Минск, Республика Беларусь). E-mail: s.kletski@mail.ru.

Летковская Татьяна Анатольевна – канд. мед. наук, доцент. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, Минск, Республика Беларусь). E-mail: taletkovskaya@mail.ru.

Жерко Ирина Юрьевна – студент. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zherko.irina@mail.ru.

Information about the authors

Semak Galina Romanovna – Ph. D. (Medicine), Associate professor. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhinsky Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: semakgalina@mail.ru.

Zaharova Viktoriya Alekseevna – Ph. D. (Medicine), Associate professor. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhinsky Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zakharava.vikt@gmail.com.

Kletsky Semen Kivovich – Ph. D. (Medicine), Associate professor. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhinsky Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: s.kletski@mail.ru.

Letkovskaya Tatiana Anatolievna – Ph. D. (Medicine), Associate professor. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhinsky Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: taletkovskaya@mail.ru.

Zherko Irina Yurievna – Student. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhinsky Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zherko.irina@mail.ru.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCESУДК 551.782.2:551.79.792(476)
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-350-359>Поступило в редакцию 13.03.2019
Received 13.03.2019**Академик А. В. Матвеев¹, Т. Б. Рылова¹, С. В. Демидова², Т. В. Якубовская²**¹*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*²*Институт геологии Научно-производственного центра по геологии, Минск, Республика Беларусь***ИЗМЕНЕНИЯ В СТРАТИГРАФИЧЕСКИХ СХЕМАХ НЕОГЕНОВЫХ
И ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ БЕЛАРУСИ
В СВЯЗИ С ПЕРЕСМОТРОМ ГРАНИЦЫ МЕЖДУ СИСТЕМАМИ**

Аннотация. В связи с решением Международного союза геологических наук о переносе нижней границы четвертичной системы/периода и плейстоценового отдела/эпохи с уровня 1,8 млн лет на уровень 2,58 млн лет (к основанию гелазского яруса/века плиоцена) вносятся изменения в Стратиграфические схемы неогеновых и четвертичных отложений Беларуси 2010 г. Неоген-четвертичная граница на территории Беларуси приведена в соответствие с Международной хроностратиграфической шкалой и проводится между холмечским горизонтом (аналог занклия и пьяченция, плиоцен) и дворецким горизонтом (аналог гелазия), перемещенным из плиоцена в основание нижнего плейстоцена квартера. Обоснование ее нового положения в разрезах выполнено по палеоботаническим данным. В региональные и местные подразделения стратиграфических схем неогена и квартера введены новые стратоны.

Ключевые слова: стратиграфическая схема, неогеновая система/период, четвертичная система/период, граница, гелазский ярус, дворецкий горизонт, палеоботанические исследования

Для цитирования: Изменения в стратиграфических схемах неогеновых и четвертичных отложений Беларуси в связи с пересмотром границы между системами / А. В. Матвеев [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 350–359. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-350-359>

Academician Aleksey V. Matveyev¹, Tat'yana B. Rylova¹, Svetlana V. Demidova², Tat'yana V. Yakubovskaya²¹*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*²*Institute of Geology of the Research and Production Center for Geology, Minsk, Republic of Belarus***CHANGES IN STRATIGRAPHIC CHARTS OF NEOGENE AND QUATERNARY DEPOSITS
OF BELARUS DUE TO THE REVISION OF THE BOUNDARY BETWEEN SYSTEMS**

Abstract. Following the decision of the International Union of Geological Sciences on the transfer of the lower boundary of the Quaternary System/Period and the Pleistocene Series/Epoch from 1.8 Ma to 2.58 Ma (to the base of the Gelazian Stage/Age of the Pliocene), the changes have been made in Stratigraphic charts of Neogene and Quaternary Deposits of Belarus (2010). The Neogene – Quaternary boundary in the territory of Belarus is aligned with the International Chronostratigraphic Chart and is made between the Kholmech horizon (analogue of Zanclean and Piacenzian, Pliocene) and the Dvoretz horizon (analogue of Gelasian) displaced from the Pliocene to the lower base of the Lowermost Pleistocene. Its new position in the sections is substantiated by paleobotanical data. New geological units were introduced into regional and local stratigraphic charts of the Neogene and Quaternary.

Keywords: stratigraphic chart, Neogene System/Period, Quaternary System/Period, boundary, Gelazian Stage, Dvoretz horizon, palaeobotanical studies

For citation: Matveyev A. V., Rylova T. B., Demidova S. V., Yakubovskaya T. V. Changes in stratigraphic charts of neogene and quaternary deposits of Belarus due to the revision of the boundary between systems. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 350–359 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-350-359>

Введение. Исполнительный комитет Международного союза геологических наук в 2009 г. ратифицировал рекомендации Международной комиссии по стратиграфии о понижении основания четвертичной системы/периода (квартера) и плейстоценового отдела/эпохи до нижней гра-

ницы гелазского яруса/века неогена на уровень 2,58 млн лет [1; 2]. Нижняя граница квартера теперь соответствует морской изотопной стадии 103 и совпадает с палеомагнитной инверсией Гаусс–Матуяма (2,588 млн лет). С событийной точки зрения основание квартера опущено в интервал, к которому приурочено глобальное похолодание, приведшее к началу материкового оледенения Северного полушария. Это похолодание соотносят с началом четвертичного периода.

В Беларуси нижняя граница четвертичной системы после изменения ее на международном уровне до недавнего времени официально не пересматривалась. В Стратиграфических схемах четвертичных и неогеновых отложений 2010 г. [3] она проведена на уровне 1,8 млн лет. К началу 2017 г. были созданы необходимые условия для решения вопросов по обеспечению геологических работ официальной стратиграфической основой: Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь (Минприроды) была образована Стратиграфическая комиссия (постановление № 39 от 30.11.2016). Комиссия функционирует при НПЦ по геологии, она уполномочена рассматривать стратиграфические схемы отложений всех геологических систем территории Беларуси и вносить предложения по их изменению с целью совершенствования. На первом заседании Стратиграфической комиссии 23 января 2017 г. были рассмотрены и рекомендованы к утверждению Стратиграфические схемы докембрийских и фанерозойских отложений Беларуси, изданные в 2010 г. и используемые в настоящее время [3]. Комиссия приняла решение об изменениях в схемах неогеновой и четвертичной систем, вытекающих из переноса нижней границы четвертичной системы/периода на уровень 2,58 млн лет. Рассмотренные комиссией стратиграфические схемы докембрия и фанерозоя Беларуси 2010 г. были утверждены Минприроды (постановление № 8 от 23.01.2017). Этим документом принята новая нижняя граница плейстоцена и четвертичной системы и увеличен стратиграфический объем отдела и системы.

Цель исследования – обоснование новой границы между неогеном и кварталом на территории Беларуси и описание опорных разрезов отложений, в которых эта граница присутствует и определяется по геологическим и палеоботаническим критериям.

Материалы и методы исследования. В сообщении использованы опубликованные, фондовые и некоторые новые материалы о строении и возрасте отложений плиоценового отдела неогена (в прежнем объеме) на территории Беларуси. Интерпретация результатов исследований в свете новых стратиграфических представлений основана на итогах анализа строения и состава отложений и изучения их спорово-пыльцевым и палеокарпологическим методами – наиболее информативными для выявления хроностратиграфических рубежей в континентальных отложениях неогена и квартера. Неогеновые отложения представлены озерными, болотными и речными фациями и распространены в южной части территории Беларуси, в пределах Брестской впадины и Припятского прогиба, севернее – в мелких изолированных контурах [4, с. 39]. Плиоценовые отложения венчают неогеновую толщу и сохранились на ограниченных площадях, на которых и изучены типовые и опорные разрезы (рис. 1). На дневную поверхность эти отложения выходят лишь в долине Днепра у д. Холмеч и Дворец в Речицком страторайоне, где определены типовые разрезы с границей, соотносимой с уровнем 2,58 млн лет.

Результаты и их обсуждение. Изменения в Стратиграфической схеме неогеновых отложений Беларуси касаются плиоценового отдела: он становится двучленным и включает нижний и верхний подотделы, соответствующие занклскому (5,33–3,60 млн лет) и пьяченцкому (3,60–2,58 млн лет) ярусам Международной хроностратиграфической шкалы. В «Региональных подразделениях» схемы упраздняется колочинский надгоризонт плиоцена, сохраняется один холмечский горизонт с двумя подгоризонтами – нижнехолмечским и верхнехолмечским. Палеонтологическая характеристика этих региональных стратоноров сохраняется как в схеме 2010 г. Дворецкий горизонт – аналог гелазия – перемещается в четвертичную систему.

Изменения претерпели местные стратиграфические подразделения плиоценового отдела, как и их корреляция. Все подразделения среднего плиоцена схемы 2010 г. становятся верхнеплиоценовыми. Отложения неогеновой системы теперь завершаются в белицкой серии бассейна палео-Нёмана: в Гродненском страторайоне – отложениями средней части александровской свиты (бывшей кинельской, по Г. И. Горецкому); во Вселюбском страторайоне – отложениями впервые

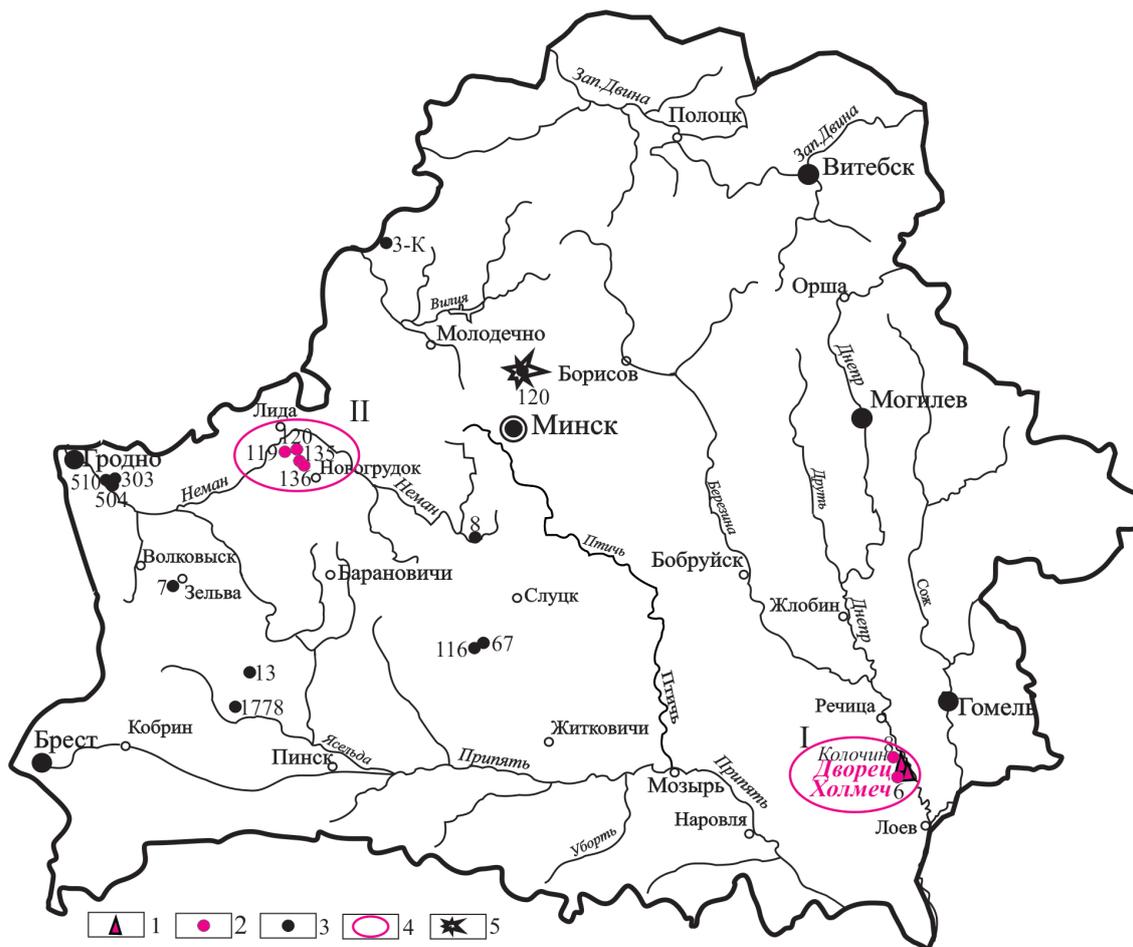


Рис. 1. Разрезы с отложениями пограничных неоген-четвертичных горизонтов: 1 – типовые обнажения: Холмеч, Дворец; 2 – скважины с типовыми отложениями: 6 – д. Дворец; 8 – д. Колочин; 119 – д. Детомля; 120 – д. Лозы; 135 – д. Кремушевка; 136 – д. Слочва; 3 – опорные скважины: 3-К – д. Давтюны; 7 – г. п. Зельва; 8 – д. Шахновщина; 13 – д. Сенкевичи; 67 – д. Кривичи; 116 – д. Вёска; 120 – д. Логоза; 303 – д. Александрово; 504 и 510 – д. Сивково; 1778 – д. Бронная Гора; 4 – стратоторайоны: I – Речицкий, II – Вселиубский; 5 – Логойский метеоритный кратер

Fig. 1. Sections with sediments of boundary Neogene-Quaternary horizons: 1 – type outcrops: Kholmec, Dvoretz; 2 – boreholes with type deposits: 6 – Dvoretz; 8 – Kolochin; 119 – Detomla; 120 – Lozy; 135 – Kremushevka; 136 – Slochva; 3 – key stratigraphic sections: 3-K – Davtiuny; 7 – Zelva; 8 – Shachnovshchina; 13 – Senkevichi; 67 – Krivichi; 116 – Vioska; 120 – Logoza; 303 – Aleksandrovo; 504 and 510 – Sivkovo; 1778 – Bronnaya Gora; 4 – stratigraphic regions: I – Rechitskiy, II – Vseliubkiy; 5 – Logoisk meteorite crater

описанной кремушевской свиты. В плиоцене бассейнов палео-Ясельды и палео-Мухавца приграничной становится соколовская свита, в Логойском метеоритном кратере – отложения гайнинской свиты на глубине около 5 м от ее кровли, из которых известна аналогичная дворецкой флора.

Сопоставление стратонавов плиоцена с подразделениями стратиграфических схем смежных регионов показало, что уровень верхней границы плиоценового отдела на территории России соотносится с кровлей ольшанского горизонта Центра Восточно-Европейской платформы, в отложениях Южного Предуралья – с кровлей кумурлинского горизонта среднего акчагыла, в Украине – с кровлей богдановского горизонта верхнего плиоцена.

К вновь установленным местным подразделениям плиоцена относится кремушевская свита с двумя подсвитами. Это плиоценовые отложения разрезов скважин, пробуренных Вилейско-Свислочской ГСП в 1975 г. (лист Новогрудок, масштаб 1 : 200000) в окрестностях д. Кремушевка и Слочва Новогрудского района, прежде относимые к асокской и детомльской свитам [5]. После

ревизии Т. Б. Рыловой [6] палинологических материалов из типовых разрезов асокской и детомльской свит (и соответствующих горизонтов) в скв. 108 у д. Асоки и 120 у д. Лозы оказалось, что соответствующие отложения относятся к верхнему миоцену. Это обстоятельство принуждает использовать новое название для свиты отложений, которые по уточненным характеристикам строения разрезов и палеоботаническим данным на участке Кремушевка–Слочва остаются в плиоцене. На рис. 2 хорошо прослеживаются различия в строении и составе неогеновых отложений разрезов указанных скважин.

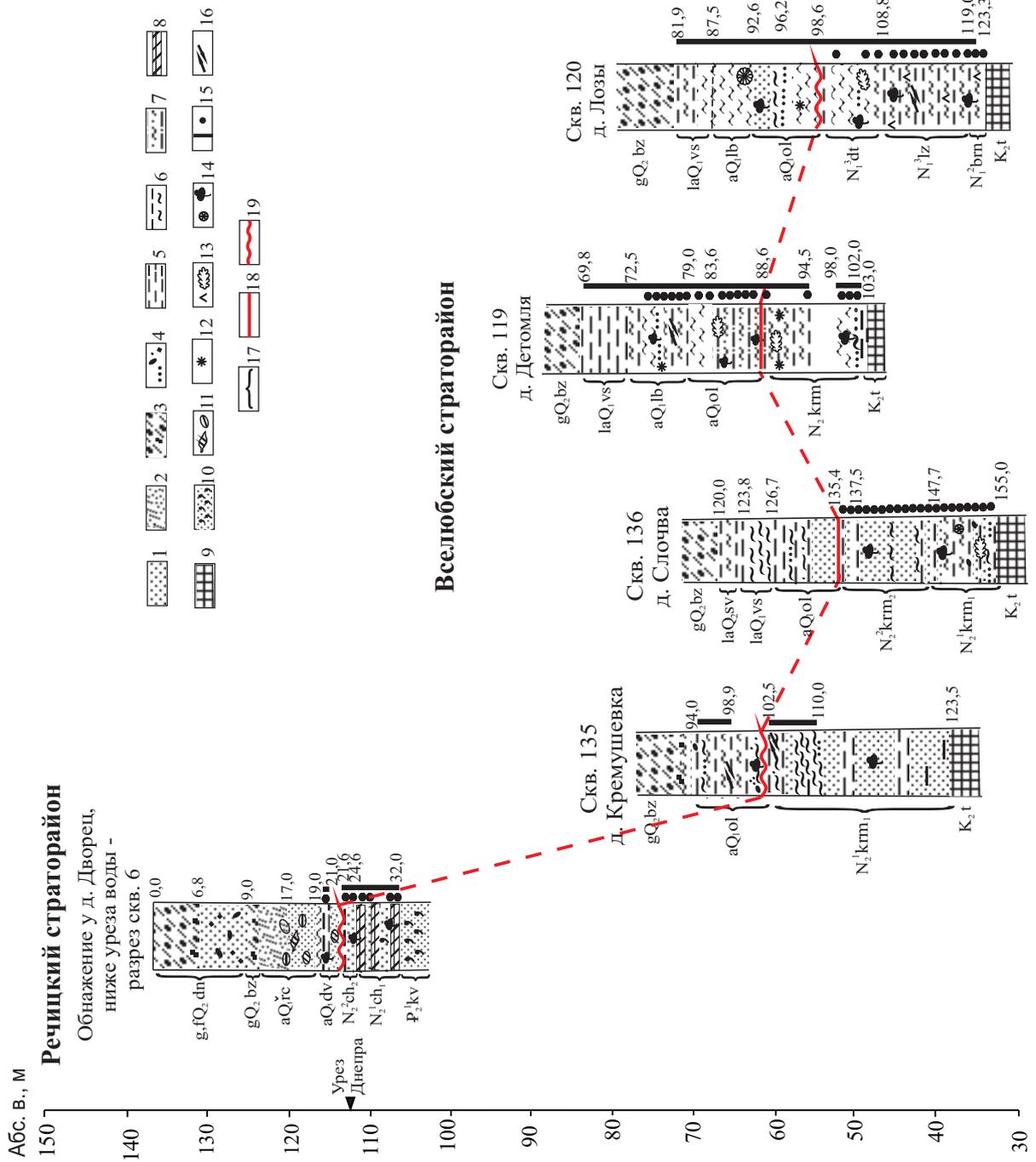
Голостратотип кремушевской свиты – отложения, вскрытые скв. 135 у д. Кремушевка на гл. 102,5–123,5 м и 136 у д. Слочва на гл. 135,4–155,0 м, получившие палеоботаническую характеристику. Нижнекремушевская подсвита (скв. 135, гл. 102,5–123,5 м; скв. 136, гл. 147,7–155,0 м) – пески тонко-мелкозернистые и разнозернистые, с прослойками глины внизу, выше – горизонтально слоистые алевриты и глины оскольчатые, с зеркалами скольжения. В скв. 135 для этих отложений (инт. гл. 102,5–109,7 м) получена диаграмма со спорово-пыльцевым комплексом *Pinus* – *Taxodiaceae* – *Quercus* – *Betula* [7, с. 70–71]. Такие же отложения вскрыты в близлежащей скв. 134 (гл. 88,0–112,6 м) в инт. гл. 96,3–108,8 м с аналогичным спорово-пыльцевым комплексом [7, с. 68–69]. В скв. 136 из всей толщи нижнекремушевской подсвиты изучена семенная флора с представителями раннего плиоцена, выявленными во флористическом комплексе (ФК) Холмеч 1: *Pilularia pliocenica* Dorof., *Typha pliocenica* Dorof., *Sparganium noduliferum* C. et E.M. Reid, *Carex* cf. *flagellata* C. et E.M. Reid, *Naumurgia subthyrsiflora* Nikit., *Ajuga antiqua* E. M. Reid, *Hartziella* sp. и др. Отложения подсвиты в этих скважинах залегают на мелу, толщина которого не дислоцирована. Мощность подсвиты во Вселюбском страторайоне достигает 24,6 м.

Верхнекремушевская подсвита выделена в разрезе скв. 136 (гл. 135,4–147,7 м), в нижней части она представлена песком тонко-мелкозернистым кварцевым, выше – чередованием песчаных, глинистых и алевритовых слоев. В породах подсвиты обнаружена семенная флора с *Azolla pseudopinata* Nikit., *Caulinia palaeotenuissima* Dorof., *Acorus pseudocalamus* Dorof., *Teucrium tatianae* Nikit. – характерными видами ФК Холмеч 2 позднего плиоцена Беларуси. Мощность отложений подсвиты здесь 12,3 м.

Таким образом, название «кремушевская свита» закрепляется за плиоценовыми отложениями белицкой серии в пределах бассейна палео-Нёмана во Вселюбском страторайоне как аналога холмечской свиты плиоцена палео-Днепра.

Изменения в Стратиграфической схеме четвертичных отложений Беларуси 2010 г. связаны с переносом в нижний плейстоцен отложений бывшего верхнего плиоцена, а именно дворецкого горизонта (аналог гелазия). Этот стратон вводится в региональные стратиграфические подразделения в основание четвертичной системы. В дворецком горизонте выделяются два подгоризонта – ольховский и любчанский.

Дворецкий горизонт назван по д. Дворец Речицкого района Гомельской области, где у д. Дворец и Холмеч в естественных обнажениях, шурфах и скважинах был вскрыт аллювий дворецкой свиты. Голостратотип горизонта и свиты – отложения на урезе воды и несколько выше в пойме правого берега Днепра, открытые в 1969 г. и комплексно изученные многими специалистами (рис. 2). Наиболее полно описаны разрезы, из которых получены детальные палеоботанические материалы, такие, как впервые изученное Н. А. Махнач 19-метровое обнажение берега Днепра [8]; расч. 1, 2, 3, исследованные Ф. Ю. Величкевичем [9]; 2 и 6 – Р. А. Зиновой и А. Ф. Бурлак [10]; расч. 1, 5 – Р. А. Зиновой и Т. Б. Рыловой [11]. Отложения дворецкого горизонта/свиты известны также в обнажении у д. Холмеч – расч. 9 в местонахождении Холмеч-2 и шурф 2 в местонахождении Холмеч-3 и вскрыты несколькими скважинами, например, 4 (гл. 26,4–28,7 м) у д. Холмеч, 8 (гл. 18–20 м) у д. Колочин (указаны палеоботанически изученные интервалы) [11]. Во всех этих разрезах данные об ископаемой флоре получены лишь для верхней части свиты, а именно для древних пойменных отложений, содержащих растительные остатки. Отложения состоят из слоистой толщи песка и алеврита кварцевого состава с незначительной примесью полевых шпатов и перекрывающей их преимущественно монтмориллонитовой глины темно-серой с растительными остатками. Общая мощность их 5–9 м. Залегают эти аккумуляции с размывом на отложениях верхнехолмечской подсвиты холмечской свиты верхнего плиоцена,



Скв. 120
д. Люзы

gQ₃ bz
laQ₃ vs
aQ₃ lb
aQ₃ ol
N₂ dt
N₁ lz
N₁ bm
K₂ t

Скв. 119
д. Детомля

gQ₃ bz
laQ₃ vs
aQ₃ lb
aQ₃ ol
N₂ krm
K₂ t

Скв. 136
д. Слочва

gQ₃ bz
laQ₃ svf
laQ₃ vs
aQ₃ ol
N₂ krm₂
N₂ krm₁
K₂ t

Скв. 135
д. Кремушевка

gQ₃ bz
aQ₃ ol
N₂ krm₁
K₂ t

Рис. 2. Граница неоген–квартер в типовых разрезах Речицкого и Вселобского стратонамов: 1 – песок; 2 – переслаивание косозалегающих песка и супеси; 3 – моренные отложения; 4 – прослой песка, гальки, гравия; 5 – глина; 6 – переслаивание глины и алевроита; 7 – переслаивание алевроита песчанистого с запесоченной глиной; 8 – гиттия; 9 – мел; 10 – песок кварцево-глауконитовый; 11 – линзы и окатыши глины и других пород; 12 – пестроцветность; 13 – диатомы и отпечатки листьев; 14 – остатки древесины и флоры; 15 – интервал отбора образцов для спорово-пыльцевого и палеокарпологиического анализов; 16 – зеркала скольжения; 17 – интрузивный ярус верхнего мела; 18 – граница неоген–квартер в непрерывном разрезе; 19 – граница неоген–квартер с перерывом в последовательности напластования. Стратиграфические индексы: K_2t – туронский ярус верхнего мела; P_2kv – киевская свита/горизонт среднего эоцена; N_1^{3lz} – бурноская свита/горизонт среднего миоцена; N_1^{3dt} – детомльская свита/горизонт верхнего миоцена; $N_2^{1hl_1}$ – нижнехолмечская подсвита/подгоризонт нижнего плиоцена; $N_2^{2km_2}$ – верхнехолмечская подсвита/подгоризонт верхнего плиоцена; N_2^{1km} – кремусhevская свита/подсвита; $N_2^{1kmp_1}$ – нижнекремусhevская подсвита нижнего плиоцена; $N_2^{2kmp_2}$ – верхнекремусhevская подсвита верхнего плиоцена; aQ_1dv – аллювиальные отложения дворецкого горизонта/свиты нижнего плейстоцена; aQ_1ol – ольховского подгоризонта (слоев); aQ_1lb – любчанского подгоризонта (слоев); aQ_1rc – озерно-аллювиальные отложения речичской свиты нижнего плейстоцена; laQ_1sv – озерно-аллювиальные отложения вселобского подгоризонта/свиты нижнего плейстоцена; laQ_2sv – озерно-аллювиальные отложения сивковской свиты среднего плейстоцена; gQ_2bz – моренные отложения березинского горизонта среднего плейстоцена; g_1fQ_2dn – моренные и флювиогляциальные отложения днепровского подгоризонта припятского горизонта среднего плейстоцена

Fig. 2. The Neogene–Quaternary boundary in type sections of Rechitsa and Vselub stratigraphic regions: 1 – sand; 2 – cross-bedding of sand and loamy sand; 3 – morainic deposits; 4 – sand, pebbles and gravel interlayers; 5 – clay; 6 – clay and silt interbedding; 7 – sandy silt and sandy clay interbedding; 8 – gytija; 9 – chalk; 10 – quartz-glaucous sand; 11 – lenses and rolls of clay and other rocks; 12 – variegation of rocks; 13 – diatoms and leaf prints; 14 – fossil wood and flora; 15 – sampling intervals for palynological and carpological analyzes; 16 – slickensides; 17 – interval of a stratigraphic unit; 18 – the Neogene–Quaternary boundary without a stratigraphic gap; 19 – the Neogene–Quaternary boundary with a stratigraphic gap. Stratigraphic indexes: K_2t – Turonian Stage of the Upper Cretaceous; P_2kv – Kiev suites/horizon of the Middle Eocene; N_1^{3bm} – Burnosy suites/horizon of the Middle Miocene; N_1^{3lz} – Lozy suites/horizon of the Upper Miocene; N_1^{3dt} – Detomlia suites/horizon of the Upper Miocene; $N_2^{1hl_1}$ – Lower Kholmecch subhorizon of the Lower Pliocene; $N_2^{2hl_2}$ – Upper Kholmecch subhorizon/subsuits of the Upper Pliocene; $N_2^{1kmp_1}$ – Lower Kremushevka subhorizon of the Lower Pliocene; $N_2^{2kmp_2}$ – Upper Kremushevka subhorizon/subsuits of the Upper Pliocene; aQ_1dv – alluvial deposits of the Dvoretz horizon/suites of the Lower Pleistocene; aQ_1ol – alluvial deposits of the Olkhovka subhorizon (layers); aQ_1lb – alluvial deposits of the Liubcha subhorizon (layers); aQ_1rc – alluvial deposits of the Rechitsa suites of the Lower Pleistocene; laQ_1sv – lacustrine-alluvial deposits of the Berezino horizon of the Middle Pleistocene; gQ_2bz – morainic deposits of the Pripjat horizon of the Middle Pleistocene; g_1fQ_2dn – morainic and glaciofluvial deposits of the Dnieper subhorizon of the Pripjat horizon of the Middle Pleistocene

перекрыты аллювием ніжняга (срэдняга?) плейстоцена, месцамі – глінамі, адносящимися к вселюбскому падгоризонту ніжняга плейстоцена. Отложения пойменной фации дворецкой свиты имеют положительную намагниченность [11], что наряду с выводами палеоботаников о сходстве ископаемой флоры с флорой тегелена Европы позволяет считать, что в разрезе Дворец присутствует субзона Олдувей магнитостратиграфической шкалы.

В дворецкой свите типовых разрезов выделена спорово-пыльцевая зона R dv 2 *Pinus – Picea – Betula* – NAP, имеющая региональное распространение. Она отличается следующими особенностями: попеременным преобладанием пыльцы AP и NAP в общем составе спектров; прева-лированием пыльцы голосеменных над пыльцой покрытосеменных древесных пород; существенной ролью пыльцы травянистых растений (до 64 %). Среди хвойных преобладает пыльца *Pinus* aff. *sylvestris* L. (до 83 %), постоянно присутствуют *Larix* (до 4 %), *Picea* (до 12 %). Среди пыльцы лиственных пород доминирует *Betula* (до 46 %), постоянно участвуют *Alnus* (до 5 %) и *Salix* (до 3 %); в незначительном количестве представлена пыльца термофильных пород: *Quercus*, *Ulmus*, *Myrica* – до 1,5 %, реже *Corylus*, *Carpinus*, *Tilia*, *Lonicera*, *Fraxinus* и др. Из пыльцы травянистых преобладают Poaceae (до 52 %) и *Artemisia* (до 24 %). Часто присутствуют споры *Bryales*, *Sphagnum*, Polypodiaceae, *Selaginella*, реже *Lycopodium*, *Ophyoglossum*, *Botrychium*, *Osmunda*, *Pteridium*, массылы *Azolla* и *Salvinia* [11].

Региональная пыльцевая зона R dv 2 соответствует фазе III, описанной Л. Стухликом на территории Польши по ряду разрезов (Ружце, Понужица и др.), коррелируемых с тегеленом и большей частью верхнего гелазия [12]. В Центральном районе Украинского щита ей соответствует спорово-пыльцевой комплекс лесостепного типа береговского горизонта [13]. Много общего она имеет также с комплексами верхнего акчагыла на востоке Русской равнины.

Семенная флора голостратотипа – ФК Дворец имеет характерные вымершие виды: *Selaginella reticulata* Dorof. et Wieliczk., *S. borysthenica* Dorof. et Wieliczk., *Potamogeton digynoides* Dorof., *Eleocharis praemaximowiczii* Dorof., *Scirpus atroviroides* Dorof., *S. liratus* Dorof., *Caulinia palaeotenuissima* Dorof., *Betula felixi* Dorof., *Ludwigia praepalustris* T. V. Jakub. et Zhuk., *Elatine hydropiperoides* Dorof. et Wieliczk., *Lysimachia nikitinii* Dorof., *Lycopus pliocenicus* Dorof., *Trapa* sp. и др. Возраст флоры по составу родов и общности видов приравнивается к тегелену Северо-Западной Европы.

Более полная последовательность отложений послехолмечского интервала разреза выявлена в пределах Вселюбского страторайона бассейна палео-Нёмана. Здесь по результатам палинологических исследований Н. А. Махнач и Т. Б. Рыловой Г. И. Горецкий [5] выделил ольховские слои с явными признаками похолодания, соотнесенные им в то время с похолоданием в начале позднего акчагыла. Ольховские слои выделены в бывшей асокской свите белицкой серии палео-Нёмана: в скв. 120 на гл. 92,6–98,6 м, в скв. 119 на гл. 78,8–88,6 м (рис. 2). Они состоят из прослоев песка тонкозернистого, разделенных алевроитом, нижний слой песка неслоистый (русло-вая фация), алевроиты и верхний песок с горизонтальной слоистостью, характерного пепельно-серого цвета, а также алевроита песчанистого зеленовато-серого с прослоями глины темно-серой в нижней части. Общая мощность отложений до 9,8 м. Залегают ольховские отложения в скв. 120, согласно схеме 2010 г., на породах детомльского горизонта верхнего миоцена со стратиграфическим перерывом в объеме верхнего в миоцене асокского горизонта и всего плиоцена. Однако в отложениях скв. 119 ольховские слои, вероятно без перерыва, залегают на плиоценовых отложениях кремущевской свиты, что показало доизучение ископаемой флоры и отражено на рис. 2.

Спорово-пыльцевые спектры ольховских слоев описаны в подкомплексах III b, c [7]. Они характеризуются следующими особенностями: преобладанием пыльцы NAP в общем составе спектров (до 77 %); небольшим содержанием пыльцевых зерен AP (иногда менее 20 %); ведущей ролью пыльцы *Betula*, в т. ч. встречается *Betula nana* L.; заметным участием *Alnus* и *Salix* среди лиственных пород; небольшой долей пыльцы хвойных, в основном *Pinus* aff. *sylvestris* L., реже *Picea*, *Larix*, *Abies*, *Juniperus*; господством пыльцы Poaceae (до 65 %) среди трав; резким увеличением количества спор зеленых мхов *Bryales*. Подобные спектры получены также по скв. 135 у д. Кремущевка (гл. 94,36–98,92 м) [7]. Ниже, до гл. 102,5 м, залегают пачка глин и алевроитов, в основании которой встречен песчанистый алевроит с гнездами песка разнотельного и гравием –

фация базального аллювия ольховских слоев. В ольховских слоях выделена спорово-пыльцевая зона R dv 1 NAP – *Betula – Pinus*, соответствующая фазе II развития растительности в Центральной Польше, по Л. Стухлику [12], коррелируемой с претегеленом Западной Европы, первой половиной гелазия. В Центральном районе Украинского щита ей может соответствовать верхний или нижний спорово-пыльцевой комплекс лесостепного типа сиверского горизонта [13].

Семенная флора ольховских слоев – ФК Ольховка, по данным П. И. Дорофеева, известна в разрезе скв. 119 у д. Детомля и выявлена Т. В. Якубовской в скв. 107 (гл. 62,0–65,5 м) у д. Кривичи Лидского района Гродненской области. Она представлена весьма бедным набором видов: *Salvinia glabra* P. Nikit., *Azolla pseudopinnata* P. Nikit., *Potamogeton vaginatus* Turcz., *P. longistylus* Dorof., *Carex paucifloroides* Wieliczk., *Betula* sp., *Hippuris vulgaris* L., *Ranunculus* ex gr. *lingua* L. и др. Более выразительная ископаемая семенная флора ФК Ольховка встречена в скв. 7 (гл. 114,5–116,4 м) у г. п. Зельва Гродненской области [14]. Она является переходной от ФК Холмеч 2 к ФК Дворец и содержит остатки *Selaginella selaginoides* (L.) P. Beauv. ex Schrank et Mart., *S. tetraedra* Wieliczk., *S. helvetica* (L.) Spring. и других представителей глациоплейстоцена, что свидетельствует о формировании ольховских слоев во время значительного похолодания. Вероятным стратиграфическим аналогом ольховских слоев в бассейне палео-Камы является зилим-васильевский горизонт верхов среднего акчагыла. Палеоботанические материалы со следами сильного похолодания позволяют рассматривать ольховские слои как отражение оледенения Северного полушария на границе неоген–квартер.

Над ольховскими слоями в типовых разрезах залегают алевроит и глина слоистые, серые с зеленоватым и голубоватым оттенком, в схеме 2010 г. выделенные как новогрудские слои, название которых упраздняется в связи с использованием его для подгоризонта в среднем плейстоцене схемы. Взамен мы употребляем название «любчанские слои», так как палеоботанические данные, уточняющие возраст этих слоев, получены в разрезах скважин недалеко от г. п. Любча. В скв. 120 у д. Лозы эти отложения вскрыты на гл. 87,5–92,6 м, в разрезе скв. 119 – на гл. 72,5–78,8 м. В скв. 120 из них описаны спорово-пыльцевые спектры подкомплекса III d, а в скв. 119 – III b [7]. Для них характерно, по сравнению с предыдущими подкомплексами, увеличение в общем составе содержания древесной пыльцы, основными составляющими которой являются *Pinus*, *Picea*, *Betula*, *Alnus*. Присутствует пыльца широколиственных пород: *Quercus*, *Tilia*, *Ulmus*, *Corylus*, в незначительном количестве представлена пыльца неогеновых реликтов, часть которой, возможно, во вторичном залегании. В отложениях выявлена региональная пыльцевая зона R dv 2 *Pinus – Picea – Betula – NAP*. Характерные вымершие виды семенной флоры – это *Azolla interglacialis* Nikit., *A. pseudopinnata* Nikit., *Potamogeton sircovense* Dorof., *Scirpus atroviroides* Dorof., *Carex paucifloroides* Dorof., *Eleocharis praemaximowiczii* Dorof., *Elatine pseudoalsinastrum* Dorof. et Wieliczk. и др., относящиеся к ФК Дворец.

Другие разрезы с любчанскими слоями и флорой ФК Дворец: скв. 20 у д. Бенин, 117 у д. Ямицы и 144 у д. Островно Новогрудского района. В пределах Вселюбского страторайона бассейна палео-Нёмана эти отложения без перерыва перекрыты вселюбским подгоризонтом нижнего плейстоцена. Вероятным стратиграфическим аналогом любчанских слоев в Предуралье являются аккумуляевский и воеводский горизонты верхнего акчагыла [15].

Изучение отложений дворецкого горизонта в пределах всей территории Беларуси показало, что они соответствуют двум крупным климатохронам. Первый из них, ранний, отвечает ольховским слоям, палеоботанические особенности которых свидетельствуют о похолодании (оледенение высоких широт Северного полушария). Следующий климатохрон характеризуется как существенно более теплый, он выявлен в собственно дворецких отложениях (дворецкая свита и ее аналоги: любчанские слои, грушевская и гайнинская свиты). Большие различия в климатических условиях для времени формирования ольховского криомера и любчанского термомера являются основанием для выделения в дворецком горизонте двух региональных стратонов – ольховского и любчанского подгоризонтов.

Полных разрезов, в которых отложения холмечского горизонта верхнего плиоцена перекрываются отложениями самого древнего в четвертичной системе дворецкого горизонта, на территории Беларуси мало. К ним относятся, в первую очередь, типовые разрезы скважин и обнажений

у д. Холмеч и Дворец, разрезы скв. 119 у д. Детомля во Вселюбском страторайоне, а также скв. 8 у д. Шахновщина Столбцовского района.

Корреляция дворцевого горизонта с подразделениями стратиграфических схем соседних регионов следующая. В схеме юго-востока Восточно-Европейской платформы Южного Предуралья (утверждена в 2018 г.) дворецкий горизонт соответствует южно-уральскому надгоризонту (включает зилим-васильевский, аккумуляевский и воеводский горизонты), т. е. части среднего и верхнему подъярусам акчагыльского региояруса [15]. На территории Польши, по Л. Стухлику [12], стратонны коррелятны ольховскому подгоризонту – Ружце, любчанскому – Понужица. В Литве дворцекому горизонту соответствует верхняя часть аникщайского горизонта [16]. В Украине ольховскому подгоризонту отвечает часть сиверского, любчанскому – береговский горизонт [13], в Западной Европе, соответственно, претегелен и тегелен.

Заключение. В соответствии с решением Международного союза геологических наук (2009 г.) о переносе нижней границы четвертичной системы/периода с уровня 1,8 млн лет на уровень 2,58 млн лет вносятся изменения в Стратиграфические схемы неогеновой и четвертичной систем Беларуси 2010 г. Из неогеновой системы Беларуси изымается дворецкий горизонт как аналог гелазия и перемещается в основание нижнего подотдела четвертичной системы. В плиоцене исключается колочинский надгоризонт; отдел становится двучленным и состоит из холмечского горизонта с двумя подгоризонтами – нижнехолмечским и верхнехолмечским. Вводится новый местный стратон плиоцена – кремушевская свита с двумя подсвитами. В дворцеком горизонте выделяются ольховский (нижний) и любчанский (верхний) подгоризонты. Граница неоген-квартер на территории Беларуси проводится между холмечским и дворцеком горизонтами. В большинстве разрезов она связана со стратиграфическим перерывом разной протяженности.

Список использованных источников

1. Formal ratification of the Quaternary System/Period and the Pleistocene Series/Epoch with a base at 2.58 Ma / P. L. Gibbard [et al.] // *J. Quat. Sci.* – 2010. – Vol. 25, N 2. – P. 96–102.
2. Гиббард, Ф. Л. Четвертичная система (период) и ее основные подразделения / Ф. Л. Гиббард // *Геология и геофизика.* – 2015. – Т. 56, № 4. – С. 873–875.
3. Стратиграфические схемы докембрийских и фанерозойских отложений Беларуси / С. А. Кручек [и др.]. – Минск, 2010. – 282 с.
4. Нацыянальны атлас Беларусі. – Мінск, 2002. – 292 с.
5. Горецкий, Г. И. Особенности палеопотамологии ледниковых областей (на примере Белорусского Понеманья) / Г. И. Горецкий. – Минск, 1980. – 288 с.
6. Рылова, Т. Б. Палиностратиграфия верхнего олигоцена и неогена Беларуси и закономерности развития флоры и растительности / Т. Б. Рылова. – Минск, 2002. – 40 с.
7. Рылова, Т. Б. Палинологическая характеристика неогеновых отложений Белорусского Понеманья / Т. Б. Рылова. – Минск, 1980. – 216 с.
8. Махнач, Н. А. Доминдельская флора у д. Дворец на Днепре / Н. А. Махнач, С. С. Маныкин, Е. П. Мандер // *Докл. АН БССР.* – 1970. – Т. 14, № 12. – С. 1106–1109.
9. Величквич, Ф. Ю. Новые данные о флоре д. Дворец на Днепре / Ф. Ю. Величквич // *Стратиграфия и палеогеография антропогена.* – Минск, 1975. – С. 110–133.
10. Зинова, Р. А. Геологическое строение и палинологическая характеристика обнажений у д. Дворец на Днепре / Р. А. Зинова, А. Ф. Бурлак // *Исследования земной коры территории Белоруссии.* – Минск, 1982. – С. 30–37.
11. Плиоцен Речицкого Приднепровья Беларуси / Р. А. Зинова [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1987. – 148 с.
12. Stuchlik, L. Some late Pliocene and Early Pleistocene pollen profiles from Poland / L. Stuchlik // *Cenozoic Plants and Climates of the Arctic.* – 1994. – Vol. 127. – P. 371–382. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79378-3_24
13. Сиренко, Е. А. Палиностратиграфия континентальных верхнеплиоценовых–нижнеплейстоценовых отложений южной части Восточно-Европейской платформы / Е. А. Сиренко. – Киев, 2017. – 165 с.
14. Палеоботанические метки геологической летописи в отложениях неогена и плейстоцена у п. г. т. Зельва Гродненской области / Т. В. Якубовская [и др.] // *Літасфера.* – 2007. – № 1 (26). – С. 40–54.
15. Шкатова, В. К. Совершенствование «Стратиграфической схемы квартера территории России» с целью повышения геологической обоснованности и качества Гостеолкарт 1000/3 и 200/2 / В. К. Шкатова, Е. Л. Грундан // *Неоген и квартал России: стратиграфия, события и палеогеография.* – М., 2018. – С. 88–94.
16. Кондратене, О. Стратиграфия и палеогеография квартера Литвы по палеоботаническим данным / О. Кондратене. – Вильнюс, 1996. – 213 с.

References

1. Gibbard P. L., Head M. J., Walker M. J.C. & the Subcommittee on Quaternary Stratigraphy. Formal ratification of the Quaternary System/Period and the Pleistocene Series/Epoch with a base at 2.58 Ma. *Journal of Quaternary Science*, 2010, vol. 25, no. 2, pp. 96–102. <https://doi.org/10.1002/jqs.1338>
2. Gibbard P. L. The Quaternary System/Period and its major subdivisions. *Geologiya i geofizika = Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 4, pp. 873–875 (in Russian).
3. Kruchek S. A., Matveev A. V., Yakubovskaya T. V. [et al.]. *Stratigraphic Charts of Precambrian and Phanerozoic deposits of Belarus*. Minsk, 2010. 282 p. (in Russian).
4. *National Atlas of Belarus*. Minsk, 2002. 292 p. (in Belarusian).
5. Goreckij G. I. *Specifics of the paleopotamology of glacial regions (on the example of the Belarusian Ponemanye)*. Minsk, 1980. 288 p. (in Russian)
6. Rylova T. B. *Palyostratigraphy of the Upper Oligocene and Neogene of Belarus and patterns of development of flora and vegetation*. Minsk, 2002. 40 p. (in Russian)
7. Rylova T. B. *Palyological characteristics of the Neogene deposits of the Belarusian Ponemanye*. Minsk, 1980. 216 p. (in Russian)
8. Mahnach N. A., Manykin S. S., Mander E. P. Premindel flora nearby the Dvoretz village on the Dnieper. *Doklady Akademii nauk BSSR = Doklady of the Academy of Sciences of the BSSR*, 1970, vol. 14, no. 12, pp. 1106–1109 (in Russian).
9. Velichkevich F. Yu. New data on flora nearby the Dvoretz village on the Dnieper. *Stratigrafiya i paleogeografiya antropogena [Stratigraphy and paleogeography of the Quaternary]*. Minsk, 1975, pp. 110–133 (in Russian).
10. Zinova R. A., Burlak A. F. Geological structure and palynological characteristics of the outcrops nearby the Dvoretz village on the Dnieper // *Issledovaniya zemnoj kory territorii Belorussii [Studies of the earth crust on the territory of Belarus]*. Minsk, 1982, pp. 30–37 (in Russian).
11. Zinova R. A., Rylova T. B., Dromashko S. G., Shimanovich S. L., Murashko L. I. *The Pliocene of the Rechytsa Pridneprovye of Belarus*. Minsk, 1987. 148 p. (in Russian).
12. Stuchlik L. Some late Pliocene and Early Pleistocene pollen profiles from Poland. *Cenozoic Plants and Climates of the Arctic*, 1994, vol. 127, pp. 371–382. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79378-3_24
13. Sirenko E. A. *Palyostratigraphy of the continental Upper Pliocene – Lower Neo-Pleistocene sediments of the southern part of the East European Platform*. Kiev, 2017. 165 p. (in Russian).
14. Yakubovskaya T. V., Litvinyuk G. I., Savchenko I. E., Zhukovskaya T. V. Palaeobotanical evidences of the geological record in Neogene and Pleistocene deposits nearby the Zelva settlement, Grodno region. *Litasfera = Lithosphere*, 2007, no. 1 (26), pp. 40–54 (in Russian).
15. Shkatova V. K., Grundan E. L. Improvement of the «Stratigraphic chart of the Quaternary of the Territory of Russia» in order to increase the geological coherence and quality of State Geological Maps 1000/3 and 200/2. *Neogen i kvarter Rossii: stratigrafiya, sobytiya i paleogeografiya [Neogene and Quaternary of Russia: stratigraphy, events and paleogeography]*. Moscow, 2018, p. 88–94 (in Russian).
16. Kondratene O. *Stratigraphy and paleogeography of the Quaternary of Lithuania based on paleobotanical data*. Vilnius, 1996. 213 p. (in Russian).

Информация об авторах

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

Рылова Татьяна Борисовна – д-р геол.-минералог. наук, доцент, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rylova@ecology.basnet.by.

Демидова Светлана Владимировна – канд. геол.-минералог. наук, заместитель директора. Институт геологии (ул. Купревича, 7, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: demidovasvet@mail.ru.

Якубовская Татьяна Васильевна – канд. геол.-минералог. наук, доцент. Институт геологии (ул. Купревича, 7, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tvyakub@tut.by.

Information about the authors

Matveev Aleksey Vasil'evich – Academician, D. Sc. (Geology), Professor, 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.

Rylova Tat'yana Borisovna – D. Sc. (Geology), Assistant professor, 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: rylova@ecology.basnet.by.

Demidova Svetlana Vladimirovna – Ph. D. (Geology), Deputy director. Institute of Geology (7, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: demidovasvet@mail.ru.

Yakubovskaya Tat'yana Vasil'evna – Ph. D. (Geology), Assistant Professor. Institute of Geology (7, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tvyakub@tut.by.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCESУДК 621.762.8
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-360-369>Поступило в редакцию 19.09.2018
Received 19.09.2018**Л. Н. Дьячкова¹, академик П. А. Витязь², член-корреспондент А. Ф. Ильющенко¹,
Л. Я. Воронецкая¹, А. И. Лецко¹, Н. М. Парницкий¹**¹*Институт порошковой металлургии имени О. В. Романа Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*²*Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНОЙ ДОБАВКИ АЛЮМИНИДА ЖЕЛЕЗА
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА И МЕДИ**

Аннотация. Представлены результаты исследований влияния введения алюминидов железа различного химического и фазового состава на структуру и механические свойства порошковой углеродистой стали и оловянистой бронзы. Показано, что введение 0,5 % однофазного алюминидов железа Fe_3Al приводит к повышению прочности порошковой углеродистой стали на 30–40 МПа, двухфазного $Fe_2Al_5-FeAl_3$ – на 80–90 МПа, 1 % – к незначительному снижению прочности. При введении однофазного алюминидов железа в структуре порошковой стали наблюдается уменьшение цементита, разноточности, происходит диффузия алюминия в основу, при введении двухфазного алюминидов – еще и измельчение зерна. Установлено, что введение 0,5 % однофазного алюминидов железа в порошковую бронзу позволяет повысить ее прочность на 80–100 МПа, двухфазного – приводит к снижению прочности на 40–50 МПа. Введение 1 % однофазного алюминидов железа и 0,2–1 % двухфазного алюминидов вызывает изменение морфологии структуры порошковой бронзы вследствие легирования основы алюминием и железом.

Ключевые слова: порошковые материалы на основе железа и меди, алюминиды железа, структура, плотность, прочность

Для цитирования: Влияние ультрадисперсной добавки алюминидов железа на структуру и свойства порошковых материалов на основе железа и меди / Л. Н. Дьячкова [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 360–369. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-360-369>

**Larisa N. Dyachkova¹, Academician Petr A. Vityaz², Corresponding Member Alexandr Ph. Ilyushchenko¹,
Leonora J. Voronetskaya¹, Andrey I. Letsko¹, Nikolay M. Parnitsky¹**¹*Powder Metallurgy Institute named after O. V. Roman of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*²*Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***INFLUENCE OF THE ULTRAFINE IRON ALUMINIDE ADDITIVE ON THE STRUCTURE
AND PROPERTIES OF IRON AND COPPER POWDER MATERIALS**

Abstract. The results on the effect of introduction of iron aluminide of various chemical and phase compositions on the structure and mechanical properties of powdered carbon steel and tin bronze are presented. It is shown that the introduction of 0.5 % single-phase iron aluminide Fe_3Al leads to an increase in the strength of powdered carbon steel by 30–40 MPa, of bi-phase $Fe_2Al_5-FeAl_3$ – by 80–90 MPa, 1 % – to an insignificant decrease in strength. When a single-phase iron aluminide in the powder steel structure is introduced, a decrease in cementite, differentiation is observed, aluminum diffusion into the substrate occurs, and when two-phase aluminide is introduced, the structure gridding occurs as well. It is established that the introduction of 0.5 % single-phase iron aluminide into powder bronzes makes it possible to increase its strength by 80–100 MPa, two-phase – leads to a reduction in strength by 40–50 MPa. Introduction of 1 % single-phase iron aluminide and 0.2–1 % biphasic aluminide causes a change in the morphology of the structure of the powder bronze due to alloying the copper with aluminum and iron.

Keywords: powder materials based on iron and copper, iron aluminides, structure, density, strength

For citation: Dyachkova L. N., Vityaz P. A., Ilyushchenko A. Ph., Voronetskaya L. J., Letsko A. I., Parnitsky N. M. Influence of the ultrafine iron aluminide additive on the structure and properties of iron and copper powder materials. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 360–369 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-360-369>

Введение. Антифрикционные материалы, обладающие минимальными значениями коэффициента трения и износа трущихся поверхностей, обеспечивают высокую надежность и долговечность узлов трения. Среди них наиболее эффективными являются порошковые композиционные материалы на основе железа (стали и сплавы) и меди (бронзы и латуни) [1–3].

Целесообразность применения порошковых изделий из цветных металлов обусловлена экономической необходимостью, связанной с уменьшением износа сложной или дорогостоящей сопрягаемой детали. Наиболее традиционными порошковыми материалами на основе меди являются оловянистые бронзы, имеющие хорошие механические и триботехнические свойства, а также оловянистые бронзы, легированные хромом, никелем, свинцом. Для работы в узлах трения без жидкой смазки при средних и тяжелых условиях работы, а также в агрессивных средах применяют порошковые хромооловянистые и хромоникелевооловянистые бронзы [4].

Порошковые антифрикционные материалы на основе меди обладают хорошей прирабатываемостью, коррозионной стойкостью, электропроводимостью. В то же время повышенная пластичность материалов на медной основе позволяет использовать их только при невысоких нагрузках, а при высоких нагрузках, как правило, используют композиционные антифрикционные материалы на основе железа.

Для улучшения свойств в порошковые материалы вводят многочисленные добавки в разной концентрации [5–9]. Введение добавок в наносостоянии оказывает более существенное влияние на свойства порошковых материалов, чем в ультрадисперсном, благодаря способности нанодобавок, обладающих высокой активностью, взаимодействовать с основой материала, тем самым упрочняя зерно [8; 10].

Известно [11], что наиболее износостойкими являются материалы с гетерогенной структурой, состоящей из твердых включений, равномерно распределенных в упругопластической металлической матрице. Такая структура позволяет эффективно тормозить движение дислокаций, соответственно, рост зерна как при низких, так и при высоких температурах, а также снизить скорость пластической деформации. При нагружении гетерогенного материала в процессе трения действующая нагрузка распределяется по твердым включениям, а в упругопластической матрице происходит релаксация напряжений.

Введение интерметаллидов в антифрикционные материалы оказывает положительный эффект на их свойства благодаря уникальности физико-механических характеристик интерметаллидов [12]. Однако порошки интерметаллидов имеют различный химический и фазовый состав, а также получают их различными методами, это оказывает влияние на физико-механические свойства, соответственно, в зависимости от состава и метода получения интерметаллидов будет меняться их воздействие на основу антифрикционного материала.

В работе в качестве добавки в антифрикционные материалы на основе железа и меди использовали порошок интерметаллида системы Fe–Al, получаемый МАСВС.

Цель работы – исследование влияния содержания ультрадисперсной добавки алюминида железа на структуру и свойства порошковых материалов на основе железа и меди.

Материалы и методы исследования. Реакция синтеза интерметаллидов из элементов является экзотермической [13], что обеспечивает получение их методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Метод позволяет формировать сложные комплексные соединения и многокомпонентные композиции различной дисперсности в одну стадию. Использование предварительной механоактивации реакционных смесей в высокоэнергетических мельницах перед СВС обеспечивает повышение активности порошков и создание однородной мелкозернистой структуры с содержанием растворенных элементов выше значений предельной растворимости [14; 15].

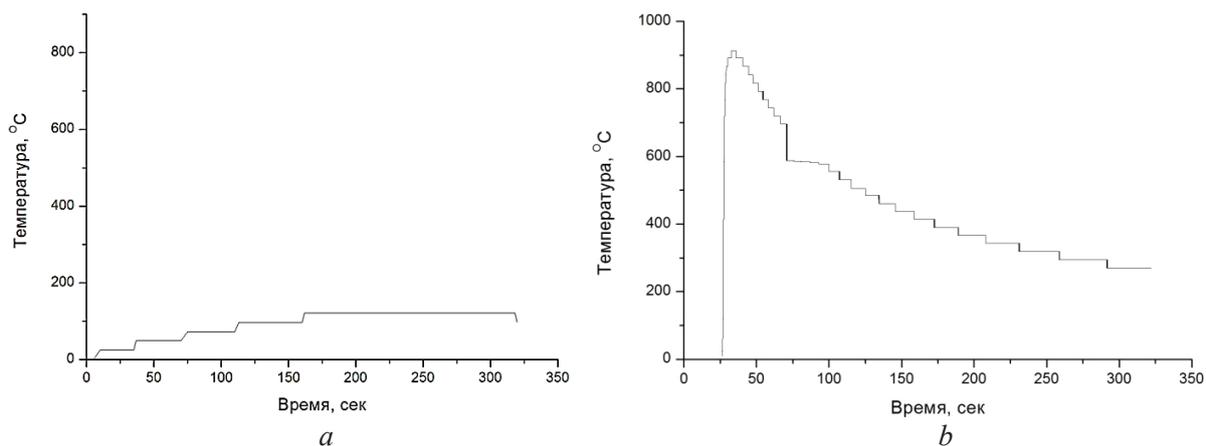


Рис. 1. Динамика температуры горения реакционных смесей системы Fe–Al: *a* – Fe–17 мас. % Al; *b* – Fe–57 мас. % Al
 Fig. 1. Combustion temperature dynamics of reaction mixtures of Fe–Al: *a* – Fe–17 wt. % Al; *b* – Fe–57 wt. % Al

Механоактивацию реакционных смесей Fe–17 мас. % Al и Fe–57 мас. % Al в работе проводили в планетарной шаровой мельнице Retsch PM 400 (Германия) в течение 1,5 ч при скорости вращения 350 об/мин. СВС полученных смесей осуществляли в экспериментальном реакторе постоянного давления в аргоне. После остывания полученный спек подвергали размолу с последующим просевом полученных порошков и выделением требуемой фракции – менее 3 мкм.

Согласно полученным данным, температура горения для механоактивированных смесей системы Fe–Al составляет 840–912 °С. Процесс горения данных реакционных смесей проходил активно без интенсивного разброса материала. Незначительная динамика кривой горения для реакционной смеси Fe–17 мас. % Al (рис. 1, *a*) свидетельствует как о частичном прохождении реакции в процессе механоактивации, так и о недостаточном количестве запасенной энергии для начала процесса. Нагрев и выдержка в течение 5 мин смеси при 400 °С в шахтной печи позволили провести процесс СВС. Площадки на термограммах (рис. 1, *b*) свидетельствуют об образовании фаз Fe₃Al, FeAl₂, Fe₂Al₅, FeAl₃ как наиболее выгодных с термодинамической точки зрения в условиях СВС для системы Fe–Al.

Рентгеноструктурный анализ, проведенный на многоцелевом рентгеновском дифрактометре Ultima IV и дифрактометре общего назначения ДРОН-3.0 в CuK_α монохроматизированном излучении с использованием системы автоматизации сбора и обработки информации с помощью программы Crystallographica SearchMatch (Oxford), показал, что порошок алюминиды железа с содержанием алюминия 17 % состоит из интерметаллида Fe₃Al, твердого раствора алюминия в железе и α-Fe, с содержанием 57 % алюминия – интерметаллидов Fe₂Al₅ и FeAl₃, имеются также в небольшом количестве интерметаллиды FeAl и FeAl₂.

Ультрадисперсную добавку однофазного (с 17 % алюминия) и двухфазного (с 57 % алюминия) алюминиды железа в количестве 0,2; 0,5; 1,0 мас. % вводили в порошковую сталь ЖГр1,5 бронзу БрО10.

Порошковую сталь получали смешиванием порошка железа марки ПЖРВЗ со средним размером частиц 160 мкм, графита марки ГК-2 в количестве 1,5 мас. %, порошковую бронзу – смешиванием порошка меди марки ПМС-1 и олова марки ПО-1 в количестве 10 мас. % в смесителе типа «пьяная бочка» в течение 2 ч при соотношении шары : шихта 1 : 1. Из смешанной шихты прессовали призматические образцы шириной 10 мм, высотой 5,5 мм, длиной 55 мм для определения предела прочности при трехточечном изгибе и цилиндрические образцы диаметром 10 мм, высотой 12 мм для исследования триботехнических свойств. Плотность спрессованных образцов из порошковой стали составила 83–85 %, из порошковой бронзы – 87–88 %. Спрессованные образцы спекали в защитно-восстановительной атмосфере эндогаза в течение 1 ч. Температура спекания порошковой стали 1100 °С, порошковой бронзы – 800 °С.

Испытания на трехточечный изгиб проводили на испытательной машине Tinius Olsen (Англия) при скорости нагружения 2 мм/мин.

Микроструктуру порошков алюминидов и спеченных материалов исследовали методами оптической (на металлографическом микроскопе MEF-3, Австрия) и сканирующей электронной (на микроскопе высокого разрешения Miра, Чехия) микроскопии, распределение элементов в спеченном материале – микрорентгеноспектральным анализом на рентгеноспектральном анализаторе INCA 350 фирмы Oxford Instruments (Англия).

Согласно исследованию на СЭМ, порошок однофазного алюминида железа имеет размер частиц 1,5–4,8 мкм, двухфазного – 1,0–3,5 мкм

Микродюрометрический анализ порошков алюминидов, проведенный на микротвердомере Akashi (Япония) при нагрузках 25 и 200 г, выявил, что микротвердость порошка Fe–17 мас. % Al 0,3–0,64 ГПа, Fe–57 мас. % Al – 0,67–1,0 ГПа.

Результаты и их обсуждение. Исследование относительной плотности образцов из порошковой стали показало, что при введении однофазного алюминида железа плотность повышается до 89 %, двухфазного – до 90,2 % (рис. 2, а). При введении однофазного алюминида относительная

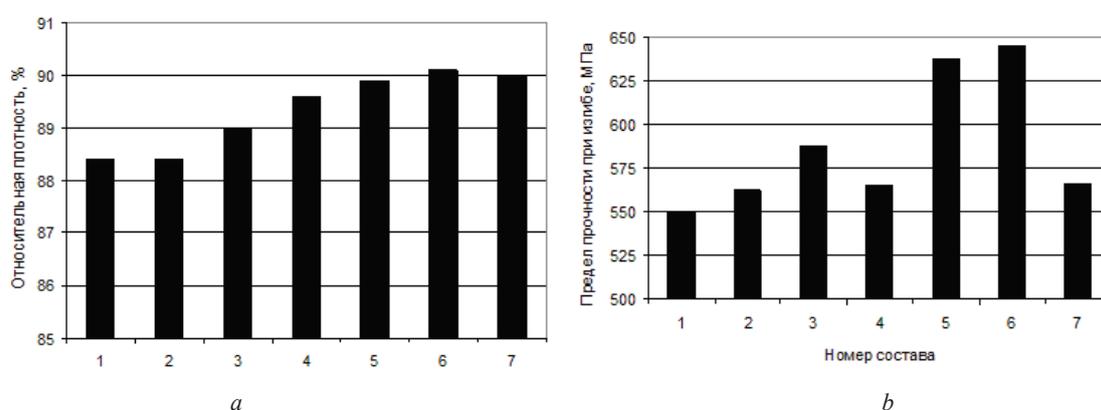


Рис. 2. Влияние содержания добавки алюминида железа на плотность (а) и прочность (b) порошкового материала ЖГр1,5: 1 – без добавки; 2 – 0,2 % Fe₃Al; 3 – 0,5 % Fe₃Al; 4 – 1 % Fe₃Al; 5 – 0,2 % Fe₂Al₅–FeAl₃; 6 – 0,5 % Fe₂Al₅–FeAl₃; 7 – 1 % Fe₂Al₅–FeAl₃

Fig. 2. The effect of the iron aluminide additive content on the density (a) and strength (b) of sintered powder material FGr1.5: 1 – without additive; 2 – 0.2 % Fe₃Al; 3 – 0.5 % Fe₃Al; 4 – 1 % Fe₃Al; 5 – 0.2 % Fe₂Al₅–FeAl₃; 6 – 0.5 % Fe₂Al₅–FeAl₃; 7 – 1 % Fe₂Al₅–FeAl₃

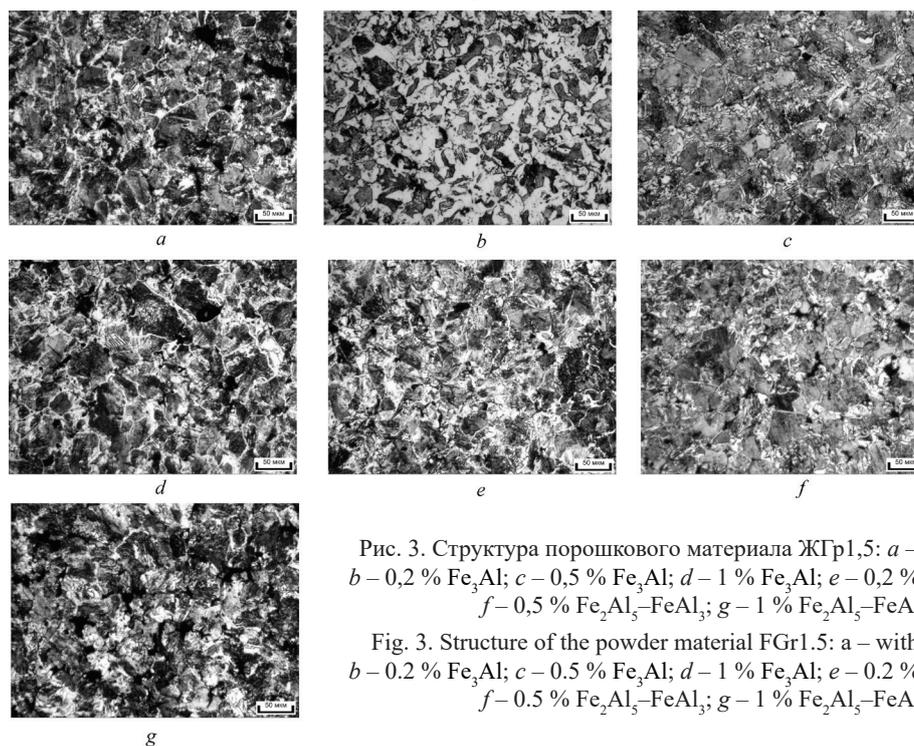


Рис. 3. Структура порошкового материала ЖГр1,5: а – без добавки; b – 0,2 % Fe₃Al; c – 0,5 % Fe₃Al; d – 1 % Fe₃Al; e – 0,2 % Fe₂Al₅–FeAl₃; f – 0,5 % Fe₂Al₅–FeAl₃; g – 1 % Fe₂Al₅–FeAl₃

Fig. 3. Structure of the powder material FGr1.5: a – without additive; b – 0.2 % Fe₃Al; c – 0.5 % Fe₃Al; d – 1 % Fe₃Al; e – 0.2 % Fe₂Al₅–FeAl₃; f – 0.5 % Fe₂Al₅–FeAl₃; g – 1 % Fe₂Al₅–FeAl₃

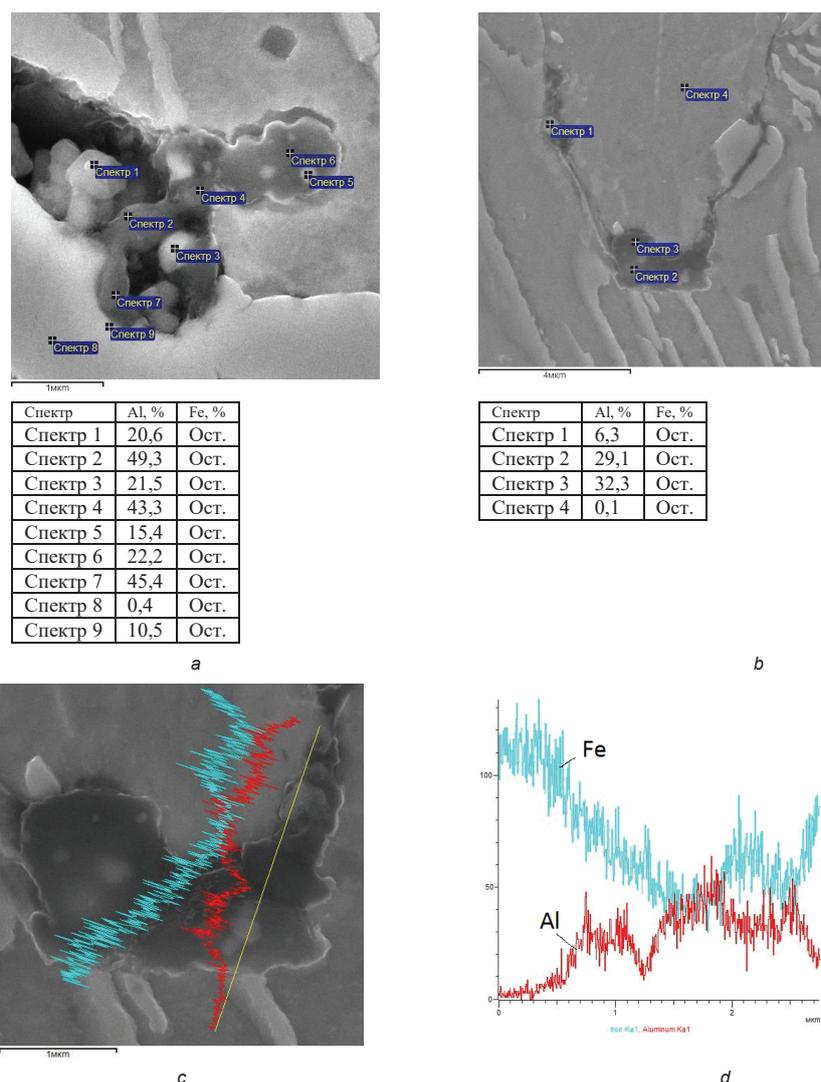


Рис. 4. Микрорентгеноспектральный анализ основы и включений в порошковом материале ЖГр1,5: *a* – двухфазный алюминид; *b, c, d* – однофазный алюминид; *a, b* – точечный анализ включения и основы, X45000; *c, d* – распределение железа и алюминия, X45000; *a* – X35000; *b* – X15000

Fig. 4. Micro-X-ray spectral analysis of the base and inclusions in powder material FeGr1.5: *a* – biphas aluminate; *b, c, d* – single-phase aluminate; *a, b* – point inclusion and base point analysis, X450; *c, d* – distribution of iron and aluminum, X45000; *a* – X35000; *b* – X15000

плотность монотонно повышается с увеличением содержания добавки от 0,2 до 1 мас. %, а при введении двухфазного алюминида плотность практически не зависит от содержания добавки.

Прочность порошковой стали с добавкой алюминида железа (рис. 2, *b*) не имеет прямой зависимости от относительной плотности. Увеличение количества алюминида железа до 0,5 % приводит к повышению прочности на 30–40 МПа (при введении однофазного алюминида) и на 80–90 МПа (при введении двухфазного алюминида железа), а до 1 % – к незначительному снижению прочности в случае введения однофазного алюминида железа, и на 60–65 МПа – при введении двухфазного алюминида железа.

Повышение прочности при введении 0,5 % алюминида объясняется уменьшением количества цементита и разнотерности структуры в порошковой стали с добавкой Fe₃Al (рис. 3, *b, f*) по сравнению со сталью без добавки (рис. 3, *a*), а в случае двухфазного алюминида – еще и более мелкозернистой структурой благодаря меньшему размеру частиц двухфазного алюминида (рис. 4, *a*) и меньшим количеством феррита (рис. 3, *e–g*). Уменьшение прочности при введении 1 % добавки

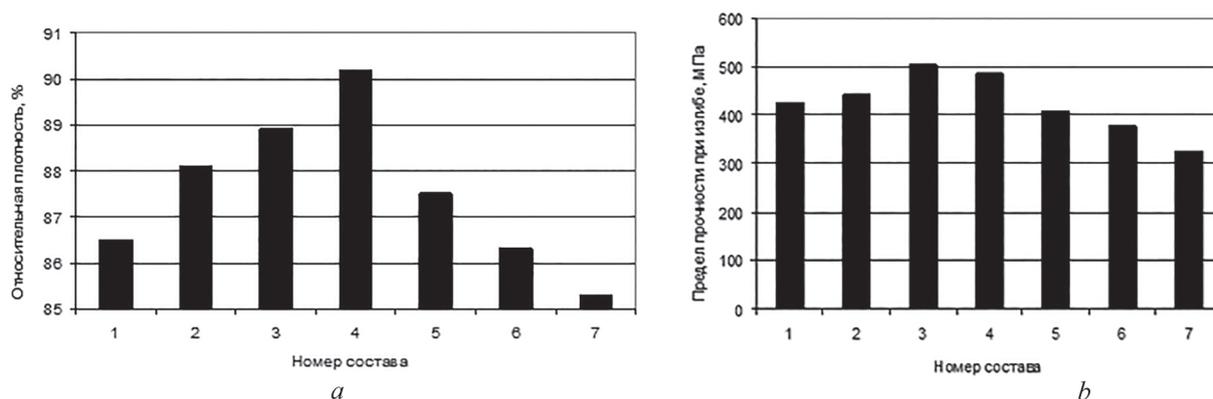


Рис. 5. Влияние содержания добавки алюминиды железа на плотность (а) и прочность (b) порошковой бронзы БрО10: 1 – без добавки; 2 – 0,2 % Fe₃Al; 3 – 0,5 % Fe₃Al; 4 – 1 % Fe₃Al; 5 – 0,2 % Fe₂Al₅-FeAl₃; 6 – 0,5 % Fe₂Al₅-FeAl₃; 7 – 1 % Fe₂Al₅-FeAl₃

Fig. 5. The effect of the iron aluminide additive content on the density (a) and strength (b) of powder bronze CuSn10: 1 – without additive; 2 – 0.2 % Fe₃Al; 3 – 0.5 % Fe₃Al; 4 – 1 % Fe₃Al; 5 – 0.2 % Fe₂Al₅-FeAl₃; 6 – 0.5 % Fe₂Al₅-FeAl₃; 7 – 1 % Fe₂Al₅-FeAl₃

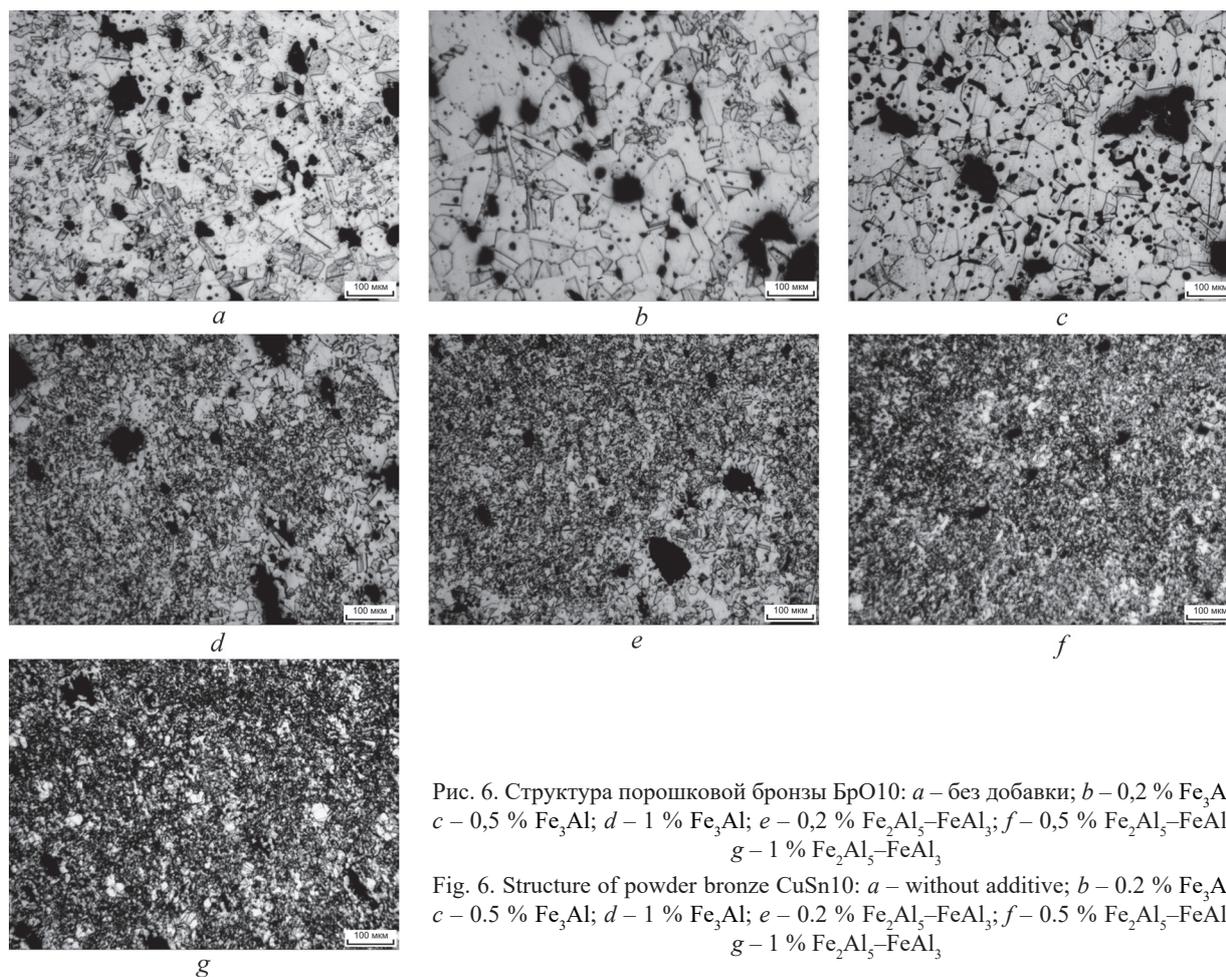


Рис. 6. Структура порошковой бронзы БрО10: а – без добавки; б – 0,2 % Fe₃Al; с – 0,5 % Fe₃Al; д – 1 % Fe₃Al; е – 0,2 % Fe₂Al₅-FeAl₃; ф – 0,5 % Fe₂Al₅-FeAl₃; г – 1 % Fe₂Al₅-FeAl₃

Fig. 6. Structure of powder bronze CuSn10: a – without additive; b – 0.2 % Fe₃Al; c – 0.5 % Fe₃Al; d – 1 % Fe₃Al; e – 0.2 % Fe₂Al₅-FeAl₃; f – 0.5 % Fe₂Al₅-FeAl₃; g – 1 % Fe₂Al₅-FeAl₃

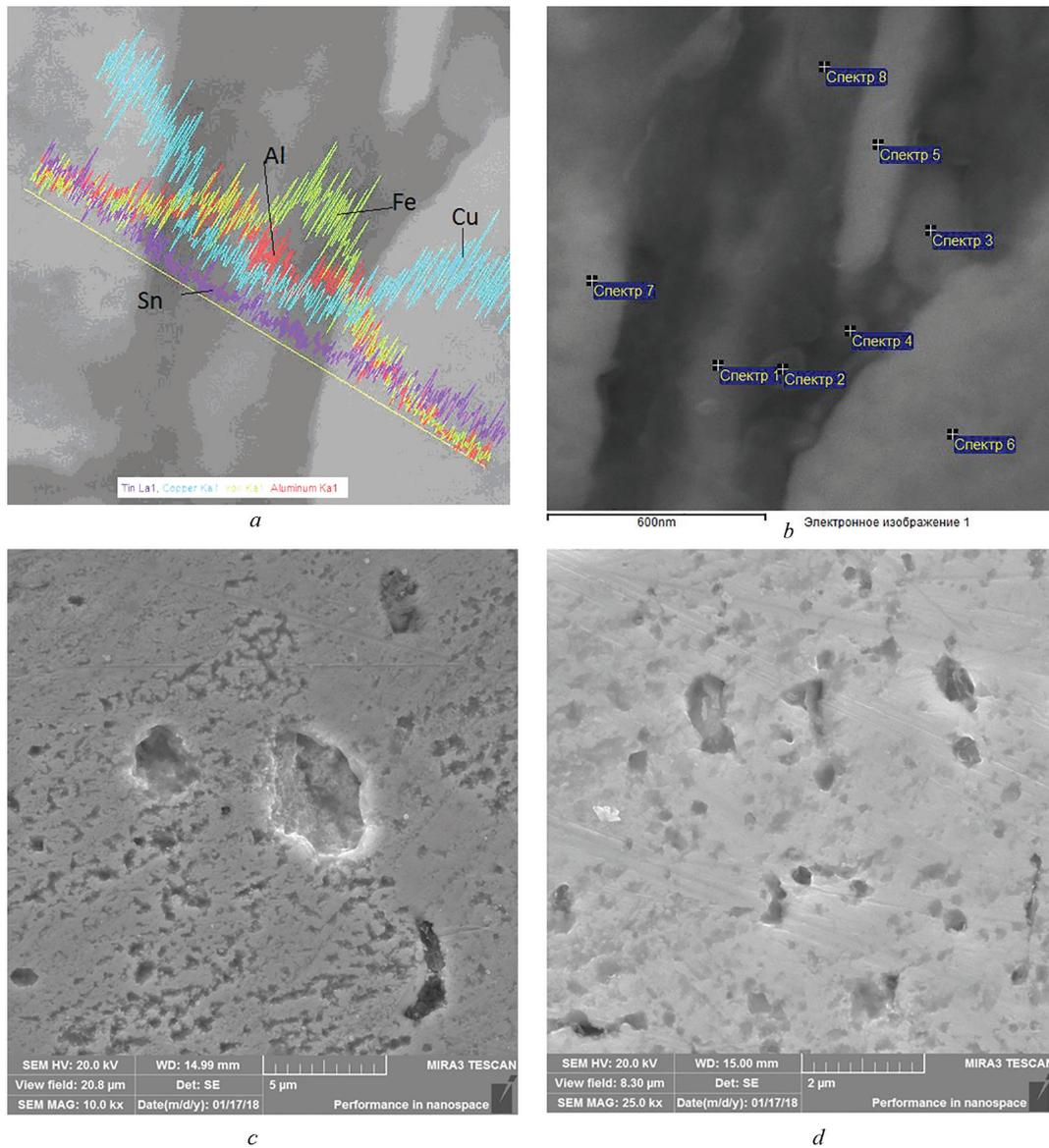


Рис. 7. Включения алюминидов в порошковой бронзе БрО10 и распределение элементов: *a, b, c* – Fe_3Al ; *d* – $Fe_2Al_5-FeAl_3$; *a* – распределение элементов в алюминиде и медной основе; *b* – точечный анализ; *c, d* – в отраженных электронах

Fig. 7. Inclusions of aluminide in powder bronze CuSn10 and distribution of elements: *a, b, c* – Fe_3Al ; *d* – $Fe_2Al_5-FeAl_3$; *a* – distribution of elements in aluminide and copper base; *b* – point analysis; *c, d* – in the back scattering electrons

Точечный анализ основы и интерметаллида (рис. 7, б)

The point analysis of base material and inclusions of aluminide (Fig. 7, b)

Спектр Spectrum	Al, %	Fe, %	Sn, %	Cu, %
1	16,1	47,3	4,1	Ост.
2	23,3	27,5	5,0	Ост.
3	10,9	47,3	4,7	Ост.
4	17,3	31,5	5,1	Ост.
5	17,1	54,1	3,4	Ост.
6	2,6	2,0	10,5	Ост.
7	8,5	6,5	9,0	Ост.
8	19,7	38,2	5,4	Ост.

обусловлено увеличением количества феррита (рис. 3, *d, g*) и ослаблением границ располагающимися преимущественно по границам зерен включениями алюминидов (рис. 4, *b*).

Исследование структуры при большом увеличении и МРСА позволило выявить, что алюминид железа взаимодействует с основой, участки алюминидов на границе с основой содержат меньшее количество алюминия (рис. 4, *c, d*).

Влияние введения однофазного и двухфазного алюминидов на изменение плотности при спекании порошковой бронзы БрО10 такое же, как и порошковой стали ПК100 (рис. 5, *a*): добавка однофазного алюминидов железа вызывает усадку образцов, двухфазного – рост. Такую же зависимость прочности от добавки алюминидов, как порошковая сталь, имеет и порошковая бронза (рис. 5, *b*). Наибольшую прочность имеет порошковая бронза с добавкой 0,5 % однофазного алюминидов железа. Это объясняется, по-видимому, тем, что равномерно распределенные включения интерметаллида в основе (рис. 6) служат препятствиями при движении дислокаций и способствуют измельчению структуры. Увеличение содержания алюминидов до 1 % вызывает изменение морфологии структуры порошковой бронзы (рис. 6, *d*). Происходит это, как показал микрорентгеноспектральный анализ, вследствие легирования основы алюминием и железом. Снижение прочности порошковой бронзы при введении двухфазного алюминидов также объясняется изменением морфологии структуры (рис. 6, *e–g*), причем такая структура формируется уже при содержании 0,2 % добавки. Происходит это потому, что частицы двухфазного алюминидов существенно меньше, чем однофазного (1,0–3,5 и 1,5–4,8 мкм соответственно) (рис. 6, *c, d*), и диффузия железа и алюминия в основу происходит значительно быстрее.

На рис. 7, *a* видно, что содержание железа и алюминия плавно уменьшается при переходе в медную матрицу. Согласно точечному анализу, содержание алюминия изменяется от 27,5 % в центре алюминидов (рис. 7, *b*, спектр 1, таблица) до 8,5 % в основе на расстоянии 0,2 мкм от включения (рис. 7, *b*, спектр 7, таблица) и до 2,6 % – на расстоянии 0,5 мкм от включения (рис. 7, *b*, спектр 6, таблица), а содержание железа – от 47,3 до 6,5 % и до 2 % соответственно.

Заключение. Исследовано влияние введения алюминидов железа различного химического и фазового состава на структуру и механические свойства порошковой углеродистой стали и оловянистой бронзы. Показано, что введение 0,5 % однофазного алюминидов приводит к повышению прочности порошковой углеродистой стали на 30–40 МПа, двухфазного – на 80–90 МПа, 1 % – к незначительному снижению прочности. При введении 0,2–0,5 % однофазного алюминидов железа в структуре порошковой стали наблюдается уменьшение содержания цементита, разноразмерности, происходит диффузия алюминия в основу, двухфазного алюминидов – еще и измельчение зерна.

Установлено, что введение 0,5 % однофазного алюминидов железа в порошковую бронзу позволяет повысить ее прочность на 80–100 МПа, двухфазного – приводит к снижению прочности на 40–50 МПа. Введение 1 % однофазного алюминидов железа и 0,2–1 % двухфазного алюминидов вызывает изменение морфологии структуры порошковой бронзы вследствие легирования основы алюминием и железом.

Список использованных источников

1. Батаев, А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение / А. А. Батаев, В. А. Батаев. – М., 2006. – 400 с.
2. Федорченко, И. М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы / И. М. Федорченко, Л. И. Пугина. – Киев, 1980. – 404 с.
3. Порошковая металлургия, материалы, технология, свойства, области применения / И. М. Федорченко [и др.]. – Киев, 1985. – 624 с.
4. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / В. Н. Анциферов [и др.]. – М., 1987. – 792 с.
5. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П. А. Витязь [и др.]. – Минск, 2011. – 527 с.

6. Sadykov, F. A. Wear of copper and its alloys with submicrocrystalline structure / F. A. Sadykov, N. P. Barykin, I. R. Aslanyan // *Wear*. – 1999. – Vol. 225–229. – P. 649–655. [https://doi.org/10.1016/s0043-1648\(98\)00374-3](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(98)00374-3)
7. Li, Ai-min. Mechanical properties and microstructure of Fe–Al/Al₂O₃ composite with Cr, Mo и Ti / Ai-min Li, Sun Kangning, Bi Jiangiang // *Trans. Nonferrous Metals Soc. China*. – 2003. – Vol. 13, N 4. – P. 860–863.
8. Дьячкова, Л. Н. Исследование влияния добавок механоактивированных порошков оксидов на структуру и свойства порошкового материала на основе железа / Л. Н. Дьячкова, Т. Л. Талако // *Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка: в 2 ч.* – Минск, 2009. – Ч. 2. – С. 65–70.
9. Дьячкова, Л. Н. Исследование процесса повышения механических и триботехнических свойств порошковых материалов на основе железа введением ультрадисперсных добавок / Л. Н. Дьячкова, И. Н. Лецко // *Весті Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-техн. навук.* – 2007. – № 3. – С. 21–26.
10. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М., 2005. – 416 с.
11. Гаркунов, Д. Н. Триботехника (износ и безызносность) / Д. Н. Гаркунов. – М., 2001. – 616 с.
12. Карапетян, Г. Х. Износостойкие порошковые материалы с интерметаллидным упрочнением. I. Беспористые материалы антифрикционного назначения / Г. Х. Карапетян, Х. Л. Акопов, Ф. Х. Карапетян // *Порошковая металлургия*. – 1987. – № 4. – С. 75–79.
13. Mechanically activated synthesis studied by X-ray diffraction in the Fe–Al system / F. Chariot [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 1999. – Vol. 262, N 1–2. – P. 279–288. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(98\)01017-x](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(98)01017-x)
14. Application of the mechanical activation and self-propagating high-temperature synthesis for preparation of monophasic ultrafine compounds / M. A. Korchagin [et al.] // *Problems of Material Sciences*. – 2002. – N 1 (29). – P. 418–423.
15. Влияние механохимической активации на концентрационные границы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Т. Ф. Григорьева [и др.] // *Докл. РАН*. – 1999. – Т. 369, № 3. – С. 345–347.

References

1. Bataev A. A., Bataev V. A. *Composite materials: structure, production, application*. Moscow, 2006. 400 p. (in Russian).
2. Fedorchenko I. M., Pugina L. I. *Composite sintered antifriction materials*. Kiev, 1980. 404 p. (in Russian).
3. Fedorchenko I. M. [et al.]. *Powder metallurgy, materials, technology, properties, applications*. Kiev, 1985. 624 p. (in Russian).
4. Antsiferov V. N., Bobrov G. V., Druzhinin L. K., Kiparisov S. S., Kostikov V. I., Krupin A. V., Kudinov V. V., Libenson G. A., Mitin B. S., Roman O. V. *Powder metallurgy and sprayed coatings*. Moscow, 1987. 792 p. (in Russian).
5. Knight P. A. [et al.]. *Modification of materials and coatings with nanoscale diamond-containing additives*. Minsk, 2011. 527 p. (in Russian).
6. Sadykov F. A., Barykin N. P., Aslanyan I. R. Wear of copper and its alloys with submicrocrystalline structure. *Wear*, 1999, vol. 225–229, pp. 649–655. [https://doi.org/10.1016/s0043-1648\(98\)00374-3](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(98)00374-3)
7. Ai-min Li, Sun Kangning, Bi Jiangiang. Mechanical properties and microstructure of Fe–Al / Al₂O₃ composite with Cr, Mo and Ti. *Trans. Nonferrous Metals Soc. China*, 2003, vol. 13, no. 4, pp. 860–863.
8. Dyachkova L. N., Talako T. L. Investigation of the effect of additives of mechanically activated powders of oxides on the structure and properties of a powder material based on iron. *Surface engineering. New powder composite materials. Welding: in 2 part*. Minsk, 2009, part 2, pp. 65–70 (in Russian).
9. Dyachkova L. N., Letsko I. N. Investigation of the process of increasing the mechanical and tribological properties of iron-based powder materials by introducing ultradispersed additives. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2007, no. 3, pp. 21–26.
10. Gusev A. I. *Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies*. Moscow, 2005. 416 p. (in Russian).
11. Garkunov D. N. *Tribotechnika (wear and non-weariness)*. Moscow, 2001. 616 p. (in Russian).
12. Karapetyan G. Kh., Akopov H. L., Karapetyan F. Kh. Wear-resistant powder materials with intermetallic hardening. I. Bessporous materials of antifriction use. *Powder metallurgy*, 1987, no. 4, pp. 75–79 (in Russian).
13. Chariot F., Gaffet E., Zeghmati B., Bernard F., Niepce J. C. Mechanically activated synthesis studied by X-ray diffraction in the Fe–Al system. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, vol. 262, no. 1–2, pp. 279–288. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(98\)01017-x](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(98)01017-x)
14. Korchagin A. A. [et al.]. Application of the mechanical activation and self-propagating high-temperature synthesis for the preparation of monophasic ultrafine compounds. *Problems of Material Sciences*, 2002, vol. 1 (29), pp. 418–423.
15. Grigoryeva T. F. [et al.] The influence of mechanochemical activation on the concentration boundaries of self-propagating high-temperature synthesis. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk [Herald of the Russian Academy of Sciences]*, 1999, vol. 369, no. 3, pp. 345–347 (in Russian).

Информация об авторах

Дьячкова Лариса Николаевна – д-р техн. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт порошковой металлургии им. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dyachkova@tut.by.

Витязь Петр Александрович – академик, д-р техн. наук, профессор. Президиум НАН Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Ильющенко Александр Федорович – член-корреспондент, д-р техн. наук, профессор, директор. Институт порошковой металлургии им. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexil@mailbelpak.by.

Воронцовская Леонора Яковлевна – науч. сотрудник. Институт порошковой металлургии им. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь).

Лецко Андрей Иванович – канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт порошковой металлургии им. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: letsko@tut.by.

Парницкий Николай Михайлович – мл. науч. сотрудник. Институт порошковой металлургии им. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь).

Information about the authors

Dyachkova Larisa Nikolaevna – D. Sc. (Engineering), Associate professor, Head of the Laboratory. Powder Metallurgy Institute named after O. V. Roman (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dyachkova@tut.by.

Vityaz Petr Alexandrovich – Academician, D. Sc. (Engineering), Professor. Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Ilyushchenko Alexandr Phedorovich – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, Director. Powder Metallurgy Institute named after O. V. Roman (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexil@mailbelpak.by.

Voronetskaya Leonora Jakovlevna – Researcher. Powder Metallurgy Institute named after O. V. Roman (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus).

Letsko Andrey Ivanovich – Ph. D. (Engineering), Associate professor, Head of the Laboratory. Powder Metallurgy Institute named after O. V. Roman (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: letsko@tut.by.

Parnitsky Nikolay Mikhaylovich – Junior researcher. Powder Metallurgy Institute named after O. V. Roman (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus).

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 549.456.1:661.846.22:546.131

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-370-376>

Поступило в редакцию 05.12.2018

Received 05.12.2018

Л. В. Дихтиевская, О. Н. Лабкович, член-корреспондент В. В. Шевчук*Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

ПОЛУЧЕНИЕ БИШОФИТА ОСОБОЙ СТЕПЕНИ ЧИСТОТЫ НА ОСНОВЕ ТЕРМОГИДРОЛИЗНЫХ ОКСИДА МАГНИЯ И СОЛЯНОЙ КИСЛОТЫ

Аннотация. Показана принципиальная возможность получения бишофита особой степени чистоты путем перевода очищенных от тяжелых металлов, железа и сульфат-иона бишофитовых щелоков в нерастворимую форму (оксид магния, основные соли магния) методом их термогидролиза, с отмывкой водорастворимых примесей и синтеза бишофита из очищенного термогидролизного продукта и соляной кислоты.

Ключевые слова: бишофит, термогидролиз, оксид магния, соляная кислота, выпарка, кристаллизация

Для цитирования: Дихтиевская, Л. В. Получение бишофита особой степени чистоты на основе термогидролизных оксида магния и соляной кислоты / Л. В. Дихтиевская, О. Н. Лабкович, В. В. Шевчук // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 370–376. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-370-376>

Ludmila V. Dikhtievskaya, Olga N. Labkovich, Corresponding Member Vyacheslav V. Shevchuk*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

OBTAINING HIGH-PURITY BISHOPHITE BASED ON THERMOHYDROLYSIS MAGNESIUM OXIDE AND HYDROCHLORIC ACID

Abstract. It is shown that in principle, it is possible to obtain bischofite of high purity by converting bischofite lyes purified from heavy metals, iron and sulfate ions into an insoluble form (magnesium oxide, basic magnesium salts) using their hydrohydrolysis method, washing water-soluble impurities and synthesizing bischofite from a purified thermohydrolysis product and salt acid.

Keywords: bischofite, thermohydrolysis, magnesium oxide, hydrochloric acid, evaporation, crystallization

For citation: Dikhtievskaya L. V., Labkovich O. N., Shevchuk V. V. Obtaining high-purity bishophite based on thermohydrolysis magnesium oxide and hydrochloric acid. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 370–376 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-370-376>

Введение. Бишофитовые растворы образуются в качестве побочных продуктов в процессе переработки калийсодержащих полиминеральных руд. Они содержат хлорид магния в большом количестве, а также хлориды натрия и калия, сульфат магния, сульфат кальция, примеси железа и других тяжелых металлов. Бишофит широко используется в медицине, косметологии, пищевой промышленности и других отраслях, но для его употребления необходимым условием является химическая чистота.

В лабораторной практике и химической промышленности самым распространенным и простым методом очистки растворов от нежелательных примесей является перевод примесей в нерастворимую форму с отделением осадка от основного раствора. Таким способом очищают растворы от тяжелых металлов, железа и сульфат-иона¹. Очистка от ионов натрия и калия, которые практически не образуют нерастворимых солей, представляет значительные трудности.

© Дихтиевская Л. В., Лабкович О. Н., Шевчук В. В., 2019

¹ Способ очистки водных растворов хлоридов металлов от сульфат-ионов: пат. 2334678 РФ, МПК С01В3/16, С01F11/46 / А. М. Митрохин, Е. П. Гордон, С. А. Сергеев, Н. И. Левченко, Н. С. Поддубный, В. Н. Фомина. – Оpubл. 27.09.08; Способ очистки бишофита: пат. 2442593 РФ, МПК С22В1/00, С01F5/00, А61К33/14 / В. И. Петров, А. А. Спасов, А. А. Озеров, Б. Б. Сысуев. – Оpubл. 20.02.12; Способ локальной реагентной очистки отработанных концентрированных растворов от ионов тяжелых металлов, марганца: пат. 2299866 РФ, МПК С02F9/04 / В. Р. Легошина, А. В. Степанов, В. П. Лебедев, С. И. Бушланова, Р. Р. Мухамеджанов. – Оpubл. 27.05.2007.

В нашей работе представлен способ получения бишофита особой степени чистоты, заключающийся в переводе бишофита, предварительно очищенного от тяжелых металлов, железа и сульфат-иона, в нерастворимую форму (оксид магния и основные соли магния) методом термогидролиза, отмывке из термогидролизного продукта ионов калия, натрия, кальция и синтезе бишофита из термогидролизного продукта и соляной кислоты.

Основная часть. Синтез хлорида магния и бишофита из оксида магния и соляной кислоты проводится в соответствии с химическими реакциями



Для того чтобы увеличить скорость и полноту приведенных реакций, необходимо использовать химически активный оксид магния высокой степени дисперсности. Получение такого продукта возможно методом термического гидролиза. Суть метода заключается в том, что раствор бишофита сначала обезвоживают, а затем разлагают. Процесс разложения описывается реакцией



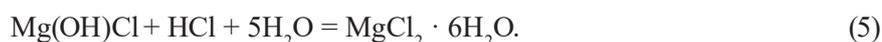
Нагревание гидратов хлорида магния сопровождается гидролизом. Вначале, после частичного обезвоживания MgCl_2 образуется $\text{MgO} \cdot 2\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, а затем в интервале температур 300–350 °С интенсивно протекает гидролиз с образованием соляной кислоты и гидроксихлорида магния MgOHCl , последний разлагается при температуре выше 550 °С на MgO и хлористый водород [1].

В промышленности термогидролиз осуществляется в реакторах кипящего слоя путем распыления раствора бишофита в высокотемпературную среду через пневматические форсунки. При этом степень распыла регулируют гранулометрический состав как обезвоженного хлористого магния, так и термогидролизного оксида магния.

Продуктом термогидролиза является аэрозоль, который состоит из окиси магния (твердая фаза) и продуктов сгорания топлива в смеси с хлоридом водорода (газообразная среда). Окись магния оседает на дно реактора и дополнительно улавливается из аэрозольного потока на стадии пылеулавливания, а горячий обжиговый газ вторично используется для подогрева щелока. В процессе контактирования между потоком газа и каплями распыленного щелока происходит одновременно очистка газа от взвешенных частиц, нагрев и испарение части воды из капелек щелока. Затем газ поступает в абсорбционную колонну, в которой происходит поглощение хлористого водорода водой с образованием чистой соляной кислоты. Концентрацию соляной кислоты регулируют изменением расхода воды и применением нескольких ступеней абсорбции (увеличение числа ступеней сорбции способствует получению более концентрированной кислоты).

Так как нам необходимо получить высокодисперсный химический активный оксид магния, то процесс термогидролиза необходимо проводить в «мягких условиях» при температуре около 550–600 °С. При более высоких температурах получаемый продукт сплавляется, удельная поверхность значительно снижается и падает его химическая активность. Кроме того, при температуре 550–600 °С разложение гидроксихлорида магния протекает с максимальной скоростью [1].

Как видно из реакций (3), термогидролизный оксид магния может содержать примеси основной соли магния $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$ в результате неполного гидролиза (при температуре ниже 550 °С и высоком давлении паров хлорводорода), что допускается, так как в конечном итоге приводит к образованию хлорида магния или бишофита. Реакции его взаимодействия с соляной кислотой представлены ниже:



Из уравнений реакций синтеза бишофита (1), (2) видно, что для получения бишофита, содержащего 6 молекул воды, требуется ввести в реакционную смесь 5 молекул воды. С соляной кислотой с концентрацией $C = 36$ мас. % вносится 7,2 молекул воды, что вполне достаточно для получения бишофита. Кроме того, термогидролизный продукт ($MgO + Mg(OH)Cl$) после отмывки водой от растворимых примесей и последующей фильтрации имеет влажность 30–40 %. Таким образом, дополнительного введения воды на проведение реакции не потребуется.

Реакция взаимодействия оксида магния с соляной кислотой экзотермична, поэтому как в лабораторных, так и промышленных условиях может осуществляться без подвода тепла извне. Температура реакционной смеси составляет 80–90 °С.

Расход соляной кислоты рассчитывается исходя из 100 % MgO . Стехиометрическое количество кислоты принимать не рекомендуется, так как ввиду летучести хлороводорода и экзотермичности реакции часть хлороводорода удалится из системы и полученный хлорид магния будет содержать некоторое количество непрореагировавшего оксида магния. Недостаток соляной кислоты недопустим, так как будет происходить неполная нейтрализация оксида кислотой с образованием основной соли:



Кроме того, основная соль $Mg(OH)Cl$ частично растворяется в хлориде магния, образуя твердый раствор [1]. Из вышеизложенного следует, что для синтеза бишофита необходимо использовать 5–10 %-ный избыток кислоты от стехиометрии.

Таким образом, теоретически установлены условия синтеза бишофита особой степени чистоты из оксида магния и соляной кислоты:

использование предварительно очищенного бишофитового рассола от ионов натрия, калия, кальция, тяжелых металлов, сульфат ионов;

проведение термогидролиза при температуре не выше 600°;

использование химически чистой соляной кислоты;

использование избытка кислоты (5–10 % от стехиометрического количества).

Важным с технологической и экономической точки зрения является то, что для этого синтеза не требуется дополнительного введения воды и подвода тепла.

В лабораторных условиях наработана партия оксида магния, полученная термогидролизом очищенного от тяжелых металлов, железа, а также сульфат-ионов бишофитового щелока. Термогидролиз проводили в муфельной печи (проведение термогидролиза в печи кипящего слоя не представлялось возможным). Рассол бишофита предварительно обезвоживали до состояния, при котором его можно было нанести очень тонким слоем на высокопрочную тугоплавкую плитку (метлахскую). Затем при 600 °С в течение 60 мин выдерживали в муфельной печи для проведения процесса термогидролиза. Далее охлаждали полученный термогидролизный продукт и проводили отмывку от водорастворимых примесей (хлоридов калия, натрия, кальция).

В бишофитовом щелоке, а также термогидролизном продукте, полученном на его основе, как правило, содержание хлорида натрия примерно в 2 раза превышает содержание хлорида калия. Вымыть хлорид калия можно быстрее при использовании горячей воды, в которой растворимость KCl повышается по сравнению с холодной водой. Хлорид кальция хорошо растворяется в холодной воде. Труднее вымыть хлорид натрия, содержание которого в продукте выше и растворимость практически не изменяется с температурой. С этой целью промывки велись небольшими порциями горячей дистиллированной водой в несколько этапов до отрицательной реакции на хлор-ион, а также ионы калия и натрия.

В незначительных количествах при промывке термогидролизного оксида магния горячей водой образуется гидроксид магния $Mg(OH)_2$. Однако этот факт допустим, так как далее в процессе синтеза бишофита он реагирует с соляной кислотой с образованием хлорида магния, а затем бишофита. Состав промывных вод представлен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Состав промывных вод, образующихся при отмывке термогидролизного продукта от водорастворимых примесей (на каждой промывке Ж : Т = 1,5)

T a b l e 1. Composition of the wash water formed during the washing of the thermo-hydrolysis product from water-soluble impurities (in each wash W : T = 1.5)

№ промывки Washing number	Содержание ионов в промывных водах, % Ion content in rinse waters, %		
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺
1	0,402	0,560	0,060
2	0,114	0,155	0,018
3	0,010	0,014	0,010
4	0,0005	0,0005	0,0002
5	0,0001	0,0002	0,0001
6	0,0001	0,0002	0,0001

Как видно из представленных результатов, при первой промывке удаляется самое большое количество ионов натрия и калия, с каждой новой промывкой содержание ионов в промывных водах снижается и после 5-й промывки процесс завершается. Оптимальный состав отмытого продукта получается при промывке Ж : Т = 6, при котором в нем отсутствуют ионы кальция, сульфат-ионы, остаются следы ионов натрия, калия.

Для того чтобы в конечном бишофите содержание иона калия составило $5 \cdot 10^{-3}\%$, что требует СТП ТУ КОМП 2-448–11 на химический чистый бишофит, в термогидролизном продукте его должно быть не более $2,5 \cdot 10^{-2}\%$. Это же соотношение соблюдается и для иона кальция.

После отмывки термогидролизный продукт отфильтровывали. После фильтрации получали оксид магния с влажностью 30–40 %. Далее очищенный влажный порошок оксида магния обрабатывали соляной кислотой марки х. ч. Обработку вели в герметичном реакционном сосуде с магнитной мешалкой и термометром, куда вносили определенное количество влажного термогидролизного оксида магния, туда же добавляли при постоянном перемешивании соляную кислоту. Если сразу прилить всю кислоту, то наблюдается бурная реакция с выделением тепла и выносом хлороводорода. Поэтому кислоту необходимо приливать небольшими порциями с небольшой скоростью.

Исследование влияния концентрации соляной кислоты на процесс получения бишофита показало, что чем концентрированнее кислота, тем реакция проходит быстрее (табл. 2), хотя на выход бишофита и его качество концентрация кислоты не оказывает влияния. При использовании разбавленной соляной кислоты происходит замедление реакции. Это связано с тем, что часть тепла, выделяемого во время реакции, идет на обогрев воды, привносимой соляной кислотой, и общая температура реакционной смеси снижается.

Т а б л и ц а 2. Влияние концентрации соляной кислоты на время реакции оксида магния и соляной кислоты

T a b l e 2. Influence of hydrochloric acid concentration on the reaction time of magnesium oxide with hydrochloric acid

Концентрация соляной кислоты, % Hydrochloric acid concentration, %	Время реакции, мин Reaction time, min
14	20
18	10
30	3
36	1

Интенсивное взаимодействие компонентов с выделением тепла приводит с течением времени к переводу суспензии в прозрачную жидкость, что говорит о завершении реакции.

Далее раствор бишофита подвергался выпарке и охлаждению с последующей кристаллизацией.

Приемлемая скорость упаривания раствора бишофита соответствует температуре около 100 °С. Учитывая, что бишофит начинает плавиться в своей кристаллизационной воде при температуре около 105 °С [1], упаривание полученного бишофитового раствора проводили при температуре 80–90 °С. Контроль процесса осуществлялся по плотности раствора $\rho = 1350 \text{ кг/м}^3$.

Охлаждение (кристаллизацию) бишофита до температуры не выше 40 °С проводили естественным путем (более длительно) или в кристаллизаторах, охлаждаемых водой.

С соблюдением указанных условий получен бишофит с содержанием ионов Mg – 11,96 %, Na – 0,008 %, K – 0,004 % (табл. 3). Исследования ионного состава полученных продуктов проводились в соответствии с ГОСТ 13685–84 «Соль поваренная пищевая. Методы испытаний». Состав полученного продукта соответствует СТП ТУ КОМП 2-448–11.

Т а б л и ц а 3. Химический анализ бишофитового щелока, продуктов термогидролиза и полученного бишофита

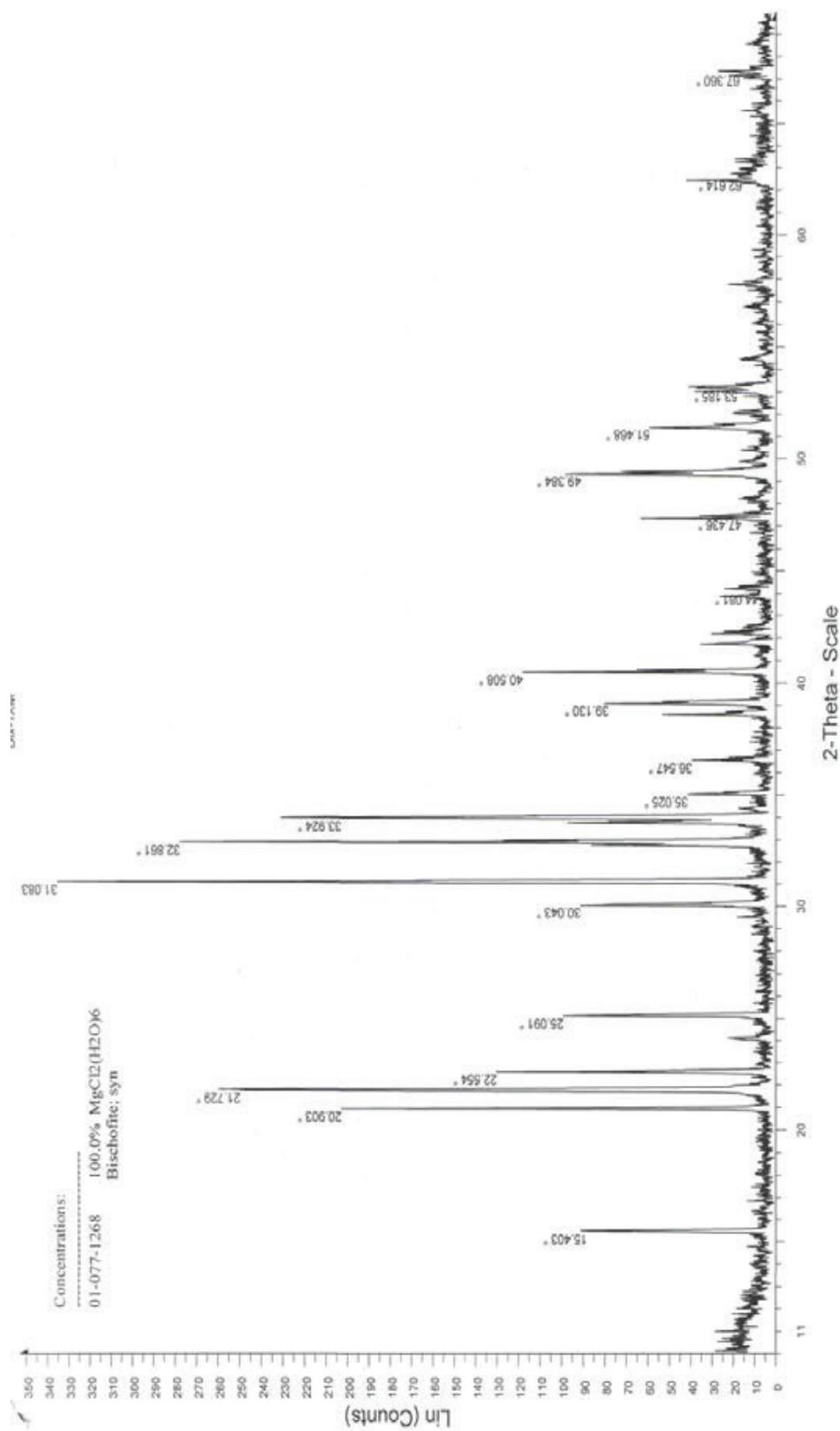
Table 3. Chemical analysis of bischofite lye, thermohydrolysis products and obtained bischofite

Содержание ионов в продукте, % Ion content in product, %						Содержание солей в продукте, % Salt content in product, %					
Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	MgO	NaCl	KCl	CaSO ₄	CaCl ₂	MgCl ₂
<i>Бишофитовый щелок, очищенный от тяжелых металлов, железа и сульфат-иона</i>											
8,01	0,11	0,06	0,12	0,009	24,93	–	0,28	0,11	0,013	0,32	31,38
<i>Термогидролизный продукт, полученный из очищенного бишофитового щелока</i>											
57,20	0,79	0,41	0,86	0,064	3,05	94,87	2,01	0,78	0,09	2,31	–
<i>Термогидролизный продукт, отмытый от водорастворимых солей при Ж : T = 3 и выпаренный при 90 °С</i>											
60,12	0,06	0,03	0,021	0,05	0,12	99,69	0,15	0,06	0,07	–	–
<i>Бишофит, полученный из отмытого от водорастворимых солей при Ж : T = 3 с влажностью 35 % термогидролизного продукта и соляной кислоты</i>											
11,95	0,012	0,006	0,004	0,010	34,88	–	0,03	0,012	0,014	–	46,81
<i>Термогидролизный продукт, отмытый от водорастворимых солей при Ж : T = 6 и выпаренный при 90 °С</i>											
60,21	0,040	0,02	0,00	0,00	0,08	99,84	0,10	0,04	–	–	–
<i>Бишофит, полученный из отмытого от водорастворимых солей при Ж : T = 6 с влажностью 35 % термогидролизного продукта и соляной кислоты</i>											
11,96	0,008	0,004	–	–	34,91	–	0,02	0,008	–	–	46,85

Химический состав чистого бишофита был подтвержден рентгенофазовым анализом, представленным на рисунке.

Заключение. Показана принципиальная возможность получения бишофита особой степени чистоты путем перевода очищенных от тяжелых металлов и железа, а также сульфат-иона бишофитовых щелоков в нерастворимую форму (оксид магния, основные соли магния) методом термогидролиза, с отмывкой водорастворимых примесей и синтеза бишофита из очищенного термогидролизного продукта и соляной кислоты.

В лабораторных условиях изучены и отработаны условия термогидролиза хлормagneйевого раствора, отмывки термогидролизного продукта от водорастворимых примесей (хлориды натрия, калия, кальция) и синтеза бишофита из отмытого термогидролизного продукта и соляной кислоты.



Рентгенограмма синтезированного бисхофита их термгидролизного продукта и соляной кислоты
 X-ray diffraction pattern of synthesized bischofite from thermohydrolysis product and hydrochloric acid

Показано, что при соблюдении разработанных условий может быть получен бишофит особой степени чистоты относительно ионов кальция, калия и натрия, пригодный для использования в пищевой промышленности и медицинских целях.

Список использованных источников

1. Фурман, А. А. Неорганические хлориды (химия и технология) / А. А. Фурман. – М., 1980. – 416 с.

References

1. Furman A. A. *Inorganic chlorides (chemistry and technology)*. Moscow, 1980. 416 p. (in Russian).

Информация об авторах

Дихтневская Людмила Валентиновна – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dixti@yandex.ru.

Лабкович Ольга Николаевна – науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lab117@tut.by.

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

Information about the authors

Dikhtievskaya Ludmila Valentinovna – Ph. D. (Chemistry), Senior researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dixti@yandex.ru.

Labkovich Olga Nikolaevna – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lab117@tut.by.

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

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

УДК 621.91.01
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384>

Поступило в редакцию 17.04.2019
Received 17.04.2019

Б. М. Базров¹, М. Л. Хейфец²

¹*Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук,
Москва, Российская Федерация*

²*Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

МЕТОД ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ КАК ОБЪЕКТА ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРУКТУРИРОВАННЫМ МНОЖЕСТВОМ МОДУЛЕЙ

(Представлено академиком А. П. Ласковневым)

Аннотация. Показаны недостатки традиционного описания изделия машиностроения, в основу которых положены технологические признаки, ориентированные на единичные, типовые и групповые операции технологического процесса. Предложено представлять конструкцию изделия и его деталей структурированным множеством соответствующих технологических модулей, в форме графа иерархической структуры. Рассмотрены численные характеристики структуры графа изделия, его уровней, узлов, ветвей. Описание конструкций изделий иерархическим графом на первом уровне позволяет выявить функциональные технологические модули изделий и на их основе построить единую классификацию и предложить кодирование изделий как объектов производства, так и эксплуатации. Представление деталей совокупностями модулей позволяет выявить модули поверхностей, базирующие, рабочие и связующие, и на их основе построить единую классификацию деталей, ориентированную на различные этапы жизненного цикла изделия. Наличие единой методической базы позволяет управлять развитием конструктивно сложных изделий, свести к минимуму дублирование в создании новых конструкций и эффективно разрабатывать ресурсосберегающие технологии их изготовления.

Ключевые слова: изделие, деталь, конструкция, объект, предмет, операция, структура, модуль, граф, уровень

Для цитирования: Базров, Б. М. Метод представления изделия как объекта цифровизации производства структурированным множеством модулей / Б. М. Базров, М. Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 377–384. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384>

Boris M. Bazrov¹, Mikhail L. Kheifetz²

¹*Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

²*Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic Belarus*

METHOD OF PRESENTING A PRODUCT AS AN OBJECT OF DIGITALIZATION OF MANUFACTURING BY A STRUCTURED SET OF MODULES

(Communicated by Academician Alexander P. Laskovnev)

Abstract. The shortcomings of the traditional description of mechanical engineering product are shown, which are based on technological features oriented to single, typical and group operations of the technological process. It was proposed to represent the design of product and its parts with a structured set of relevant technological modules, in the form of a graph of hierarchical structure. The numerical characteristics of the structure of the graph of product, its levels, nodes, branches are considered. The description of the structures of products by a hierarchical graph at the first level makes it possible to identify the functional technological modules of products and, on their basis, to construct a unified classification and to suggest coding products, both for production objects and operation. Representation of parts by a set of modules allows identifying surface modules, working and binding, and on their basis to build a single classification of parts focused on different stages of the product life cycle. The presence of a unified methodological base allows managing the development of constructively complex products, minimizing duplication in the creation of new designs and effectively developing resource-saving technologies for their manufacture.

Keywords: product, detail, construction, object, thing, operation, structure, module, graph, level

For citation: Bazrov B. M., Kheifetz M. L. Method of presenting a product as an object of digitalization of manufacturing by a structured set of modules. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 377–384 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384>

Введение. Современный уровень цифровизации промышленного производства [1] обеспечивает переход к использованию информационных технологий создания, поддержки и применения единого информационного пространства во времени на всех этапах жизненного цикла продук-

ции: от ее проектирования до эксплуатации и утилизации, т. е. к CALS-технологиям (Continuous Acquisition and Life-cycle Support) [2]. Единое информационное пространство позволяет интегрироваться разрозненным частям производственного комплекса в виртуальное предприятие, создаваемое из различных пространственно удаленных подразделений, которые обладают единой информационной ERP-системой (Enterprise Resource Planning) для использования компьютерной поддержки этапов жизненного цикла продукции [3].

В настоящее время зарождается эпоха, которую связывают с новой парадигмой производства, называемой «Индустрия 4.0». Данный термин предложен для обозначения начала «эпохи четвертой индустриальной революции», связанной с промышленным интернетом вещей (IIoT – Industrial Internet of Things) [4]. В основе новой эпохи лежит массовая компьютеризация и глобализация Интернета, поэтому дальнейшее развитие производства связывают с машинным обучением (ML – Machine Learning) и искусственным интеллектом (AI – Artificial Intelligence) [5]. Теперь при кастомизации, адаптации продукции под определенного потребителя, с учетом его интересов и требований, сам потребитель может выступать в качестве дизайнера и инженера, а по его запросам будет контролироваться, управляться и изменяться производственный процесс [6].

В результате сочетание традиционного производства, робототехники и 3D-печати на основе машинного обучения с интернетом вещей в глобальной сети и искусственным интеллектом уже сегодня позволяют создавать полностью автоматизированные фабрики [7]. Совместное действие различных цифровых технологий за счет синергетических эффектов позволяет резко повысить эффективность производства, дает возможность полностью реструктуризировать предприятия и создавать на них продукцию, которой до этого не было [8].

Продукция машиностроительного производства отличается огромным, непрерывно растущим разнообразием, поэтому целью работы является построение единой базы данных конструкций изделий и их комплектующих деталей на основе разработки предельно формализованного метода представления изделия как объекта производства, так и эксплуатации [9]. Наличие единой базы позволяет управлять развитием конструктивно сложных изделий, свести к минимуму дублирование в создании новых конструкций и эффективно разрабатывать ресурсосберегающие технологии их изготовления [10].

Анализ описания по технологическим признакам изделия машиностроения. Эффективность производства машин в первую очередь зависит от уровня технологической подготовки производства, основу которой составляют технологии [11]. В процессе эволюционного развития машиностроения сформировались три вида технологий: единичная, типовая и групповая, имеющие свои преимущества и недостатки.

Применение единичной технологии позволяет строить оптимальный процесс, но приводит к большим затратам времени на его разработку. Типовая технология, снижая объем и сроки технологической подготовки производства, не обеспечивает оптимального процесса для каждой детали одного типа. Групповая технология, хотя и увеличивает размер партии, но требует повторяемости выпуска изделий, что существенно сужает область ее эффективного применения. Кроме того, все три вида технологии не обладают гибкостью, так как не позволяют в случае необходимости изменять маршрут [9].

Поэтому, а также с учетом необходимости адаптации технологии к изделию и его функциональному назначению, возникает необходимость в разработке принципиально нового вида, предельно формализованной модульной технологии.

Одним из основных методов, используемых при исследовании и разработке технических систем, включая сложные производственные системы, является метод структурного анализа. Метод предполагает, что объекты анализа бывают двух типов: либо предметы, либо операции. Если объект анализа – предмет, то операции образуют его внешнюю среду [12].

В случае анализа производственных систем в качестве предметов рассматриваются производственные данные, а в качестве операции – преобразования над производственными данными [13]. При этом объектом анализа могут быть данные в среде преобразования или преобразования в среде данных. Модель производственной системы представляет собой иерархический набор схем, каждая из которых является детализацией какого-либо объекта (предмета или операции) и окружающей среды из схемы предыдущего (более высокого) уровня [14].

Поэтому построить единую классификацию изделий как объектов производства, так и эксплуатации, на основе представления их предметами или операциями над ними, возможно используя модульный подход при детализации конструкций изделий и их комплектующих деталей [13; 15].

Для решения поставленных задач необходимо, в первую очередь, получить информацию о характеристиках конструкций изделий (КИ). Традиционное описание КИ, в том числе и в электронной форме, включает сборочный чертеж, рабочие чертежи деталей, пояснительную записку, что не отвечает современным требованиям. На чертежах значительная часть многочисленных характеристик представлена в неявном, слабо формализованном виде. Так, на чертеже детали не указывается число поверхностей, их функциональное назначение и связи между ними. Для устранения отмеченных недостатков предлагается описание КИ совокупностью модулей [9; 11].

Представление изделия структурированным множеством модулей. В качестве модулей КИ примем модуль группы деталей (МД) изделия и модуль группы поверхностей детали – модуль поверхностей (МП). Объединение деталей в МД и поверхностей детали в МП определяется этапом жизненного цикла изделия, так как на разных этапах МД и МП выполняют разные роли и представляются разным составом, соответственно, деталей и поверхностей.

Таким образом, изделие может быть представлено совокупностью МД, а если все детали заместить совокупностями МП, то КИ можно представить множеством МП. Модульное строение КИ можно описать графом иерархической структуры, вершиной которого является базовая деталь. Например, у металлорежущего станка базовой деталью является станина.

Граф КИ строится следующим образом. Сначала определяется базовая деталь изделия, принимаемая за вершину графа, затем определяются элементы КИ (МД или детали), установленные на базовой детали, далее определяются элементы, установленные на элементах предыдущего уровня и т. д. до последнего элемента.

В результате получим граф, пример которого представлен на рис. 1.

Теперь для описания КИ воспользуемся характеристиками графа – числами: элементов, уровней, узлов, узлов на каждом уровне, ветвей.

На ребрах графа указываются координирующие размеры, связывающие комплекты баз деталей, в качестве которых выступают основные вспомогательные базы.

Основными базирующими поверхностями являются поверхности, которыми деталь устанавливается в изделие, а вспомогательными базирующими поверхностями – поверхности, на которых устанавливаются на деталь другие детали.

Узел графа несет информацию о характеристиках элемента КИ. Например, если узел отражает деталь, то указывается ее масса, габаритные размеры, материал и др. Целесообразно характеристики узлов отражать в табличной форме.

В зависимости от степени детализации описания КИ строятся графы трех уровней: МД и деталей не вошедших в их состав (первый уровень); деталей (второй уровень); МП (третий уровень).

На графе первого уровня в качестве узлов графа выступают МД и детали, не вошедшие в их состав. У графа второго уровня в качестве узлов выступают детали. У графа третьего уровня в качестве узлов выступают МП. Граф второго уровня строится замещением каждого МД в графе первого уровня графами их деталей. Граф третьего уровня строится посредством замещения в графе второго уровня каждой детали графами их МП.

Графы в обобщенной концентрированной форме представляют информацию о строении КИ: составе элементов, ее структуре, размерных, точностных, прочностных, жесткостных и других связях между элементами КИ, влияющими на образование выходных показателей КИ.

Рассмотрим описание КИ как объект эксплуатации. Изделие предназначается для выполнения рабочего процесса, поэтому все модули КИ несут соответствующую функциональную нагрузку.

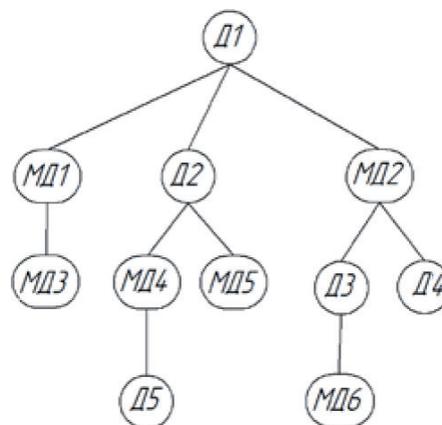


Рис. 1. Граф изделия

Fig. 1. Product graph

Аналогично и поверхности детали тоже предназначены выполнять, соответственно, служебные функции. Обозначим эти модули МДФ и МПФ.

По функциональному признаку МДФ и МПФ следует разделить на модули функциональные технологические (МФТ, МПТ) и модули функциональные обслуживающие (МФО, МПО).

МФТ – это часть КИ, с помощью которого КИ выполняет свое служебное назначение;

МФО – это часть КИ, обеспечивающая выполнение МФТ своего назначения;

МПТ – это сочетание поверхностей детали, с помощью которого деталь выполняет соответствующую служебную функцию;

МПО – это сочетание поверхностей, с помощью которого МПТ выполняет свое назначение.

Объединение деталей в МДФ и объединение поверхностей детали в МПФ по функциональному признаку обеспечивает однозначность их определений. Например, у токарного станка в качестве МФТ выступают шпиндельный узел с патроном (МФТ1), предназначенный для установки заготовки, и резцедержатель (МФТ2) для установки инструмента. Чтобы обеспечить закон относительного движения МФТ1 и МФТ2, в качестве МФО выступают коробка передач (МФО1), коробка скоростей (МФО2), двигатель (МФО3).

У автомобиля МФТ являются кузов для размещения груза (МФТ1) и шасси (МФТ2) для обеспечения движения автомобиля, а в качестве МФО выступают двигатель (МФО1), трансмиссия (МФО2) и другие устройства, обеспечивающие выполнение МФТ своих функций.

Что касается детали, то она в общем случае предназначена для выполнения изделием рабочего процесса и для установки на ней других деталей. Поэтому в качестве МПТ у детали выступают модули баз и модули рабочих поверхностей. Например, у зубчатого колеса в качестве одного МПТ выступает набор боковых поверхностей зубьев для передачи крутящего момента и второго МПТ – набор баз: торец, отверстие и боковая поверхность шпоночного паза для установки зубчатого колеса в изделии.

Для выполнения своего служебного назначения, перечисленные МПТ объединяются в деталь с помощью связующих поверхностей, объединенных в МПО.

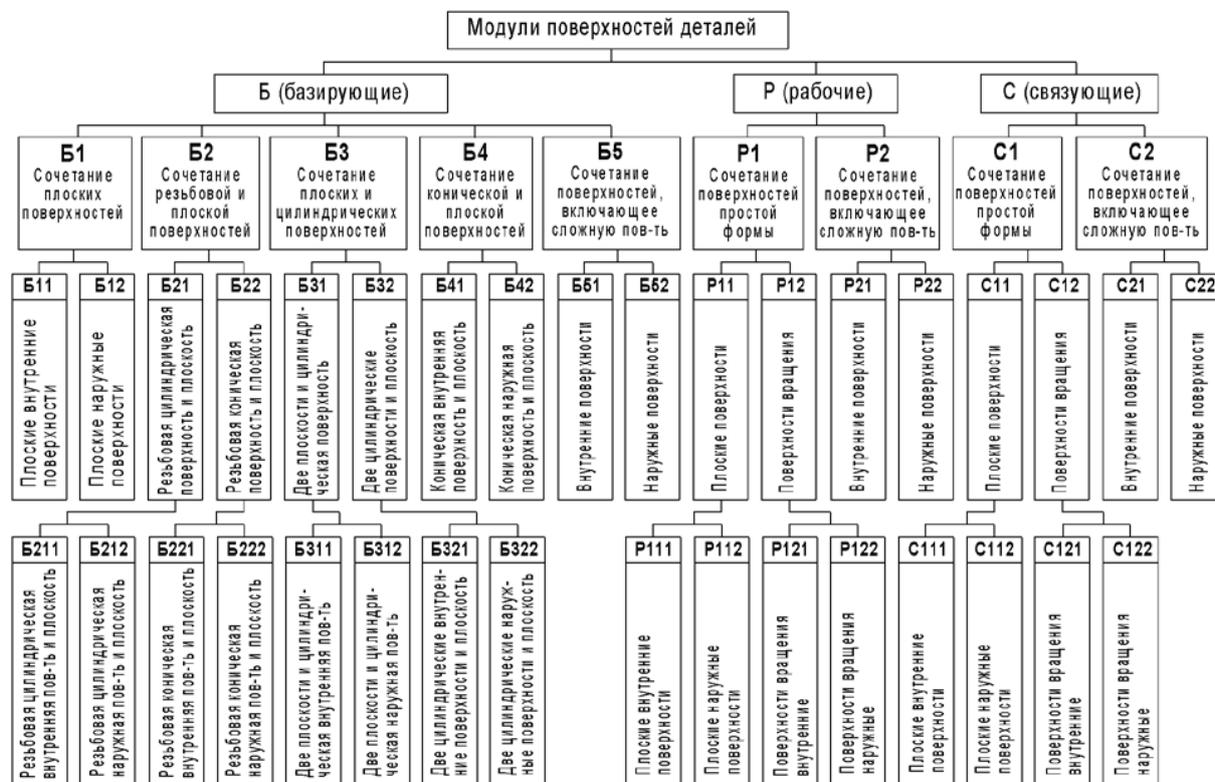


Рис. 2. Классификация и кодирование модулей функциональных поверхностей (МПФ)

Fig. 2. Classification and coding modules of functional surfaces (MFS)

Кодирование при описании функциональных технологических модулей. Для представления детали совокупностью МПФ предлагаются следующие классификация и кодирование.

По служебному признаку все МПФ делятся на три класса: базирующие (МПБ), рабочие (МПР), связующие (МПС). Такое деление МПФ придает им однозначность в определении и является главным отличием и преимуществом данной классификации.

Следующим шагом в разработке классификации МПФ является деление каждого класса на подклассы, группы, подгруппы. Поэтому далее каждый класс МПФ должен подразделяться по конструктивному и геометрическому признакам.

На рис. 2 приведена классификация и кодирование видов МПФ, из которой следует, что она содержит 26 видов МПФ, из них 14 – МПБ и по шесть видов МПР и МПС. Их примеры приведены на рис. 3.

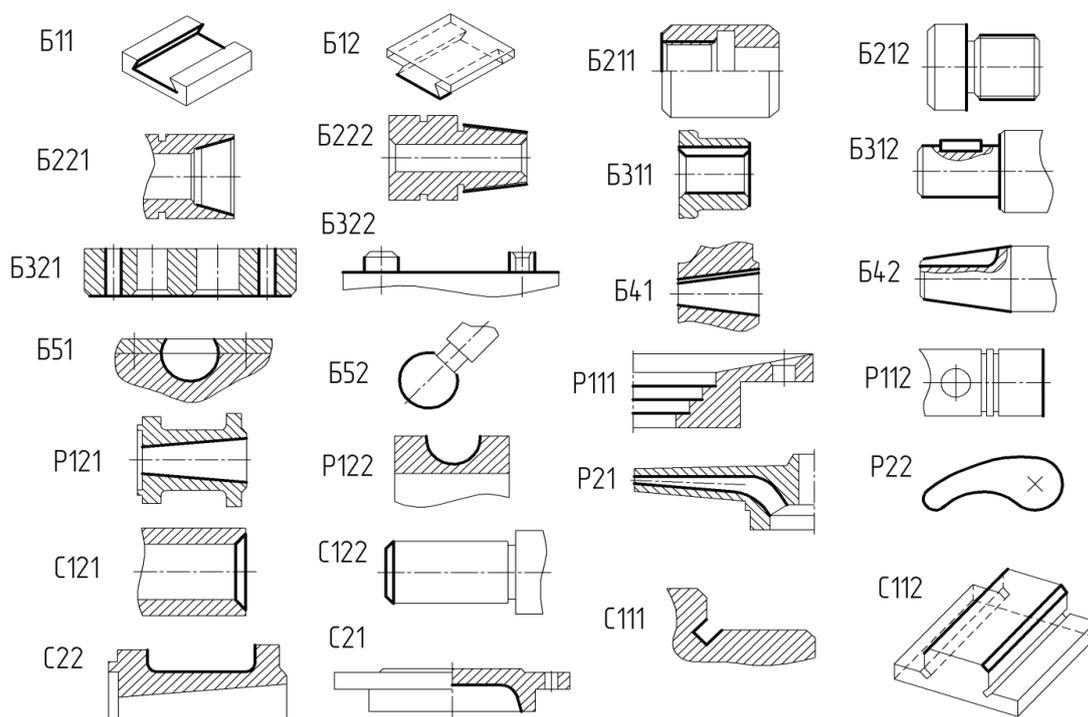


Рис. 3. Примеры конструктивного оформления видов модулей функциональных поверхностей (МПФ)

Fig. 3. Examples of constructive design types of modules of functional surfaces (MFS)

На рис. 4, *a* показан чертеж детали в модульном исполнении, где все ее поверхности закодированы, объединены в группы и соответствующие модули.

Граф МПФ детали строится следующим образом (рис. 4, *b*). За вершину графа принимаем МПБ, выступающий в роли комплекта основных баз детали. На втором уровне располагаются МПФ, конструкторской базой которых является МПФ первого уровня. На следующем уровне располагаются МПФ, конструкторской базой которых являются МПФ предыдущего уровня, и так продолжается до последнего МПФ детали.

Граф МПФ детали показывает ее структуру на модульном уровне, состав МПФ, уровень сложности конструкции. На ребрах графа могут быть указаны допуски на координирующие размеры МПФ.

Информацию о характеристиках конструкции детали удобно представлять в табличной форме (таблица), где приведены МПФ, их координирующие размеры, допуски и конструкторские базы. Замещая детали графиками их МПФ, получим граф изделия 3 уровня в виде структурированного множества МПФ.

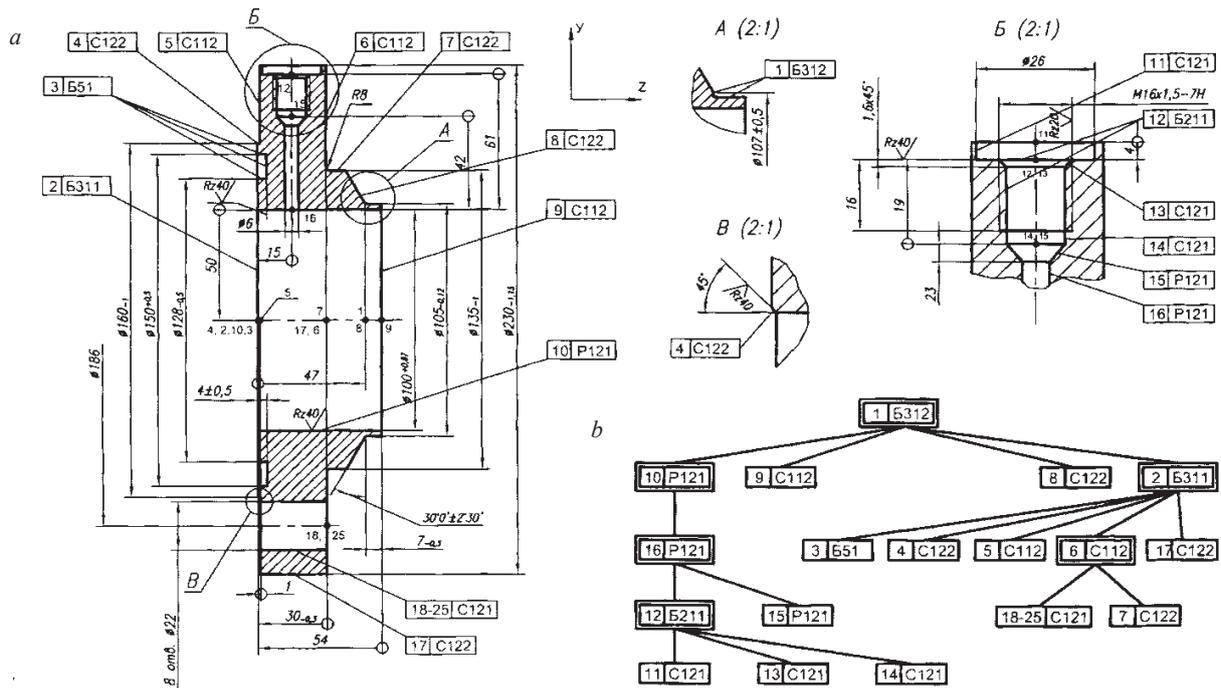


Рис. 4. Чертеж детали «Крышка» в модульном исполнении (а) и граф модулей функциональных поверхностей (МПФ) детали (б)

Fig. 4. The drawing of the part “Cover” in modular design (a) and the graph of modules of functional surfaces (MTF) of the part (b)

Кодирование и характеристики конструкции детали
Coding and design characteristics of the part

Обозначения на рис. 4 Notations in Fig. 4	Модуль поверхности Surface module	Базовые модули поверхности Basic surface modules	Параметры относительного положения модуля поверхности Parameters of relative position of the surface module					
			X, мм	Y, мм	Z, мм	ϕ°	ψ°	θ°
1	МПБ 312	—	0	0	0	0	0	0
2	МПБ 311	1 МПБ 312	0	0	-47	0	0	0
3	МПБ 51	2 МПБ 311	0	0	0	0	0	0
4	МПС 122	2 МПБ 311	0	0	0	0	0	0
5	МПС 112	2 МПБ 311	0	0	1	0	0	0
6	МПС 112	2 МПБ 311	0	0	$30_{-0,3}$	0	0	0
7	МПС 122	1 МПБ 312	0	0	-8,7	0	0	0
8	МПС 122	1 МПБ 312	0	0	0	0	0	0
9	МПС 112	2 МПБ 311	0	0	54	0	0	0
10	МПР 121	1 МПБ 312	0	0	-47	0	0	0
11	МПС 121	12 МПБ 211	0	4	0	0	0	0
12	МПБ 211	12 МПР 121	0	61	0	0	0	0
13	МПС 121	12 МПБ 211	0	0	0	0	0	0
14	МПС 121	12 МПБ 211	0	-19	0	0	0	0
15	МПР 121	16 МПР 121	0	42	0	0	0	0
16	МПР 121	10 МПР 121	90	50	15	0	0	0
17	МПС 122	1 МПБ 312	0	0	-17	0	0	0
18	МПБ 311	1 МПБ 312	-46,5	80,4	-17	0	0	0
19	МПБ 311	1 МПБ 312	-80,4	46,5	-17	0	0	0
20	МПБ 311	1 МПБ 312	-80,4	-46,5	-17	0	0	0
21	МПБ 311	1 МПБ 312	-46,5	-80,4	-17	0	0	0
22	МПБ 311	1 МПБ 312	46,5	-80,4	-17	0	0	0
23	МПБ 311	1 МПБ 312	80,4	-46,5	-17	0	0	0
24	МПБ 311	1 МПБ 312	80,4	46,5	-17	0	0	0
25	МПБ 311	1 МПБ 312	46,5	80,4	-17	0	0	0

Заключение. Предложена единая методическая база для представления изделия как объекта цифровизации производства на основе структурированного множеством модулей, позволяющая управлять развитием конструктивно сложных изделий, свести к минимуму дублирование в создании новых конструкций и эффективно разрабатывать ресурсосберегающие технологии их изготовления.

Описание конструкций изделий иерархическим графом на первом уровне позволяет выявить их функциональные технологические модули, а на их основе построить единую классификацию и предложить кодирование изделий как объектов производства, так и эксплуатации. Представление деталей совокупностями модулей позволяет выявить модули поверхностей базирующих, рабочих и связующих, ориентированные на различные этапы жизненного цикла изделия.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Российского фонда фундаментальных исследований (проект T18P-183).

Acknowledgements. Their research is supported by the Belorussian Republican Fond Fundamental Research and Russian Fond Fundamental Research (Project T18P-183).

Список использованных источников

1. Hannam, R. *Computer Integrated Manufacturing: from concepts to realization* / R. Hannam. – Harlow, 1977. – 258 p.
2. CALS в авиастроении / А. Г. Братухин [и др.]. – М., 2000. – 304 с.
3. Компьютеризированные интегрированные производства и CALS-технологии в машиностроении / под ред. Б. И. Черпакова. – М., 1999. – 512 с.
4. Витязь, П. А. «Индустрия 4.0»: от информационно-коммуникационных и аддитивных технологий к самовоспроизведению машин и организмов / П. А. Витязь, М. Л. Хейфец, С. А. Чижик // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2017. – № 2. – С. 54–72.
5. Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / под ред. М. Л. Хейфеца, Б. П. Чемисова. – Новополоцк, 2002. – 268 с.
6. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry* / ed. by F. Fores and R. Boyer. – Cambridge, 2019. – 465 p. <https://doi.org/10.1016/c2017-0-00712-7>
7. Gibson, I. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – N. Y., 2015. – 498 p.
8. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / под ред. А. М. Русецкого. – Минск, 2012. – 239 с.
9. Базров, Б. М. Модульная технология в машиностроении / Б. М. Базров. – М., 2001. – 368 с.
10. Конструирование и оснащение технологических комплексов / под ред. А. М. Русецкого. – Минск, 2014. – 316 с.
11. Базров, Б. М. Модульный принцип построения станочного оборудования / Б. М. Базров // Вестн. машиностроения. – 2011. – № 11. – С. 51–53.
12. Ross, D. T. Structured analysis for requirements definition / D. T. Ross, R. E. Schoman // *IEEE Transaction on SE*. – 1977. – Vol. SE-3, N 1. – P. 6–15. <https://doi.org/10.1109/tse.1977.229899>
13. Управление параметрами качества многофакторных технологических процессов на основе статистического и структурного анализа / П. А. Витязь [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2010. – Т. 54, № 6. – С. 111–116.
14. Технологические аспекты конверсии машиностроительного производства / А. С. Васильев [и др.]. – М.; Тула, 2003. – 271 с.
15. Дружинин, В. В. Проблемы системологии / В. В. Дружинин, Д. С. Конторов. – М., 1976. – 296 с.

References

1. Hannam R. *Computer Integrated Manufacturing: from concepts to realization*. Harlow, 1977. 258 p.
2. Bratukhin A. G., Davydov Yu. V., Eliseev Yu. S., Pavlov Yu. B., Surov V. I. *CALS in aircraft construction*. Moscow, 2000. 304 p. (in Russian).
3. Cherpakov B. I., ed. *Computerized integrated production and CALS-technologies in mechanical engineering*. Moscow, 1999. 512 p. (in Russian).
4. Vityaz P. A., Kheifetz M. L., Chizhik S. A. «Industry 4.0»: from information and communication and additive technologies to self-reproduction of machines and organisms. *Vestsi Natsyyanal'nei akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 2, pp. 54–72 (in Russian).
5. Kheifets M. L., Chemisov B. P. (eds.). *Intellectual production: state and prospects*. Novopolotsk, 2002. 268 p. (in Russian).
6. Fores F., Boyer R., eds. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*. Cambridge, 2019. 465 p. <https://doi.org/10.1016/c2017-0-00712-7>
7. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. N. Y., 2015. 498 p.
8. Rusetskii A. M., ed. *Theoretical bases of technological systems designing*. Minsk, 2012. 239 p. (in Russian).

9. Bazrov B. M. *Modular technology in mechanical engineering*. Moscow, 2001. 368 p. (in Russian).
10. Rusetskii A. M., ed. *Design and equipment of technological systems*. Minsk, 2014. 316 p. (in Russian).
11. Bazrov B. M. The modular principle of building machinery. *Vestnik Mashinostroenia [Engineering Proceedings]*, 2011, no. 2, pp. 51–53 (in Russian).
12. Ross D. T., Schoman R. E. Structured analysis for requirements definition. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1977, vol. SE-3, no. 1, pp. 6–15. <https://doi.org/10.1109/tse.1977.229899>
13. Vityaz P. A., Kheifetz M. L., Koreshkov V. N., Alekseeva T. A., Liakhovich A. K. Management of quality parameters of manufacturing processes using the statistical and structural analysis. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2010, vol. 54, no. 6, pp. 111–116 (in Russian).
14. Vasil'ev A. S., Vasin S. A., Dal'sky A. M., Kondakov A. I. *Technological aspects of the conversion of engineering production in mechanical engineering*. Moscow, Toula, 2003. 271 p. (in Russian).
15. Druzhinin V. V., Kontorov D. S. *Problems of Systemology*. Moscow, 1976. 296 p. (in Russian).

Информация об авторах

Базров Борис Мухтарбекович – д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН (Малый Харитоньевский пер., 4, 101990, Москва, Российская Федерация). E-mail: modul_lab@mail.ru.

Хейфец Михаил Львович – д-р техн. наук, профессор, заместитель академика-секретаря. Президиум НАН Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mlk-z@mail.ru.

Information about the authors

Bazrov Boris Moukhtarbekovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory. Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences (4, M. Kharitonievsky Per., 101990, Moscow, Russian Federation). E-mail: modul_lab@mail.ru.

Kheifetz Mikhail Lvovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy Academic Secretary. Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic Belarus). E-mail: mlk-z@mail.ru.