

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

2023. Т. 67. № 1

Выходит шесть номеров в год

Журнал основан в июле 1957 года

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

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

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

Главный редактор

Владимир Григорьевич Гусаков

Председатель Президиума Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

Редакционная коллегия

А. В. Кильчевский

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

Т. П. Петрович

(ведущий редактор журнала)

С. В. Абламейко – Белорусский государственный университет, Республика Беларусь

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

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

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

И. Д. Вологовский – Институт биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларуси,
Республика Беларусь

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

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

В. Л. Гурский – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
(заместитель главного редактора)

А. Е. Дайнеко – Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь

Н. Желев – Абергейский университет, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии

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

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

Н. С. Казак – Научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
Республика Беларусь

Н. Н. Казанский – Институт лингвистических исследований Российской академии наук,
Российская Федерация

С. П. Карпов – Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Российская Федерация

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

- Э. И. Коломиец** – Научно-производственное объединение «Химический синтез и биотехнологии»,
Республика Беларусь
- В. В. Лапа** – Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Беларуси,
Республика Беларусь
- М. Ларссон** – Университетский научный центр Алба Нова Стокгольмского университета, Королевство Швеция
- А. П. Ласковнѣв** – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси,
Республика Беларусь
- В. Ф. Логинов** – Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
- Г. Маркрам** – Институт мозга, Центр неврологии и технологии Швейцарского федерального института технологий,
Швейцария
- А. А. Махнач** – Институт геологии, Республика Беларусь
- А. Г. Наумовец** – Институт физики Национальной академии наук Украины, Украина
- В. А. Орлович** – Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,
Республика Беларусь
- В. Н. Пармон** – Российская академия наук, Российская Федерация
- О. Г. Пенязьков** – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Республика Беларусь
- И. Д. Рашаль** – Институт биологии Латвийского университета, Латвийская Республика
- Б. А. Ривжа** – Латвийская академия сельскохозяйственных и лесных наук, Латвийская Республика
- В. А. Садовничий** – Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Российская Федерация
- В. Г. Сафонон** – Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
- А. В. Тузиков** – Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси,
Республика Беларусь
- Тья Ван Минь** – Вьетнамская академия наук и технологий, Социалистическая Республика Вьетнам
- С. А. Усанов** – Институт биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
- Ю. С. Харин** – Научно-исследовательский институт прикладных проблем математики и информатики,
Республика Беларусь
- Л. В. Хотылева** – Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
- А. Цайлингер** – Австрийская академия наук, Австрийская Республика
- С. А. Чижик** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
(*заместитель главного редактора*)
- И. П. Шейко** – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству,
Республика Беларусь
- А. Г. Шумилин** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
- С. С. Щербаков** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

Адрес редакции:

*ул. Академическая, 1, к. 119, 220072, Минск, Республика Беларусь.
Тел.: +375 17 272-19-19; e-mail: doklady_nanb@mail.ru
doklady.belnauka.by*

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ. 2023. Т. 67. № 1

Выходит на русском, белорусском и английском языках

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

Сдано в набор 03.02.2023. Выпуск в свет 27.02.2023. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 136 экз. Заказ 33.

Цена: индивидуальная подписка – 12,66 руб.; ведомственная подписка – 29,74 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

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

© РУП «Издательский дом «Беларуская навука».
Доклады НАН Беларуси, 2023

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

2023. Vol. 67. No. 1

Published bimonthly

The journal has been published since July, 1957

Founder – National Academy of Sciences of Belarus

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

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

Editor-in-Chief

Vladimir G. Gusakov

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

Editorial Board

Alexander V. Kilchevsky

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

Tatiana P. Petrovich

(*Lead Editor*)

Sergey V. Ablameyko – Belarusian State University, Republic of Belarus

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

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

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

Sergey A. Chizhik – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

(*Associate Editor-in-Chief*)

Alexey Ye. Dayneko – Belarusian National Technical University, Republic of Belarus

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

Andrey Ya. Grigoriev – Institute of Mechanics of Metal-Polymeric Systems named after V. A. Bely of the National Academy
of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

Vasily L. Gursky – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

(*Associate Editor-in-Chief*)

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

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

Nikolay S. Kazak – State Research and Production Association “Optics, Optoelectronics and Laser Technics”,
Republic of Belarus

Nikolay N. Kazansky – Institute for Linguistic Studies of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation

Yuri S. Kharin – Research Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics, Republic of Belarus

Lyubov V. Khotylova – Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus,
Republic of Belarus

Emilia I. Kolomiets – State Research and Production Association “Chemical Synthesis and Biotechnology”,
Republic of Belarus
Alexander A. Kovalenya – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Vitaly V. Lapa – Institute for Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus,
Republic of Belarus
Mats Larsson – Alba Nova University Center of the University of Stockholm, Sweden
Alexander P. Laskovnev – Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Vladimir F. Loginov – Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Anatoly A. Makhnach – Institute of Geology, Republic of Belarus
Henry Markram – Brain Institute, Center for Neurology and Technology of the Swiss Federal Institute of Technology,
Switzerland
Anton G. Naumovets – Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine
Valentin A. Orlovich – B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Republic of Belarus
Valentin N. Parmon – Russian Academy of Sciences, Russian Federation
Oleg G. Penyazkov – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Republic of Belarus
Isaak D. Rashal – Institute of Biology of the University of Latvia, Latvia
Baiba A. Rivza – Latvian Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Latvia
Viktor A. Sadovnichiy – Lomonosov Moscow State University, Russian Federation
Vasily G. Safonov – Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Sergey S. Shcherbakov – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Ivan P. Sheyko – Scientific and Practical Center for Animal Breeding, Republic of Belarus
Alexander G. Shumilin – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Alexander V. Tuzikov – United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus,
Republic of Belarus
Sergey A. Usanov – Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Petr A. Vityaz – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Igor D. Volotovskiy – Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus,
Republic of Belarus
Vitali G. Zaleski – Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Anton Zeilinger – Austrian Academy of Sciences, Austria
Nikolas Zhelev – Abertay University, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland

Address of the Editorial Office:

1, Akademicheskaya Str., room 119, 220072, Minsk, Republic of Belarus.

Phone: +375 17 272-19-19; e-mail: doklady_nanb@mail.ru

doklady.belnauka.by

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS. 2023. Vol. 67. No. 1

Printed in Russian, Belarusian and English languages

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

Sent for press 03.02.2023. Output 27.02.2023. Format 60×84¹/₈. Offset paper.
Digital press. Printed sheets 10.23. Publisher’s signatures 11.3. Circulation 136 copies. Order 33.

Price: individual subscription – 12.66 BYN, departmental subscription – 29.74 BYN.

Publisher and printing execution:

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

© RUE “Publishing House “Belaruskaya Navuka”.
Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

- Ерофеев В. Т., Козловская И. С.** Моделирование узких пучков электромагнитных волн с осевой симметрией на плоскости 7
- Корзюк В. И., Рудько Я. В.** Классическое решение задачи Коши для одномерного квазилинейного волнового уравнения (на англ. яз.) 14

ИНФОРМАТИКА

- Залесский Б. А.** Алгоритм обнаружения движущихся объектов, наблюдаемых видеокамерой..... 20

ХИМИЯ

- Иванец А. И., Печёнка Д. В., Прозорович В. Г., Кузнецова Т. Ф.** Синтез и физико-химические свойства адсорбентов на основе $Li_{1,33}Mn_{1,67}O_4$ 27

БИОЛОГИЯ

- Урбан В. А., Вересов В. Г.** Структурное обоснование активации киназы ZAR-70 при фосфорилировании тирозинов 315, 319 и 493 38
- Воронкова Е. В., Лукша В. И., Полюхович Ю. В., Гукасян О. Н., Жарич В. М., Ермишин А. П.** Мужская фертильность растений сортов картофеля с различным типом цитоплазм..... 41

МЕДИЦИНА

- Лукашевич В. А., Пономарев В. В., Губкин С. В., Манкевич С. М.** Оценка двигательной адаптации здоровых лиц по данным пространственно-временной кинематики..... 51
- Кузнецов О. Е., Цыркунов В. М., Керимова С. Ш.** Экспрессия муцинов при раке печени..... 59

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Лысенко С. А., Зайко П. О.** Повышение точности краткосрочных численных прогнозов погоды для территории Беларуси с использованием мезомасштабной модели WRF и данных дистанционного зондирования Земли..... 66

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Витязь П. А., Григорьева Т. Ф., Жорник В. И., Ковалева С. А., Квашнин В. И., Петрова С. А., Девяткина Е. Т., Восмериков С. В., Веремей И. С., Ляхов Н. З.** Механохимическое модифицирование оловянных бронз имтерметаллидом Cu_9Al_4 74

АГРАРНЫЕ НАУКИ

- Ловкис З. В.** Экспериментальное определение параметров системы гидротранспорта плодовоовощного сырья 83

CONTENTS*MATHEMATICS*

- Erofeenko V. T., Kozlovskaja I. S.** Modeling of narrow beams of electromagnetic waves with axial symmetry on a plane 7
- Korzyuk V. I., Rudzko J. V.** Classical solution of the initial-value problem for a one-dimensional quasilinear wave equation 14

INFORMATICS

- Zalesky B. A.** Algorithm for detection of moving objects observed by a video camera 20

CHEMISTRY

- Ivanets A. I., Pecheoncka D. V., Prozorovich V. G., Kouznetsova T. F.** Synthesis and physicochemical properties of adsorbents based on $\text{Li}_{1.33}\text{Mn}_{1.67}\text{O}_4$ 27

BIOLOGY

- Urban V. A., Veresov V. G.** Structural basis of ZAP-70 activation upon phosphorylation of tyrosines 315, 319 and 493 38
- Voronkova E. V., Luksha V. I., Poliukhovich J. V., Gukasian O. N., Zharich V. M., Yermishin A. P.** Male fertility of varieties of potato with different cytoplasm type 41

MEDICINE

- Lukashevich V. A., Ponomarev V. V., Gubkin S. V., Mankevich S. M.** Evaluation of motor adaptation of healthy persons according to space-time kinematics data 51
- Kuznetsov O. E., Tsyrukunov V. M., Kerimova S. Sh.** Mucin expression in liver cancer 59

EARTH SCIENCES

- Lysenko S. A., Zaiko P. O.** Improving the accuracy of short-term numerical weather forecasts for the territory of Belarus using the mesoscale WRF model and Earth remote sensing data 66

TECHNICAL SCIENCES

- Vityaz P. A., Grigoreva T. F., Zhornik V. I., Kovaliova S. A., Kvashnin V. I., Petrova S. A., Devyatkina E. T., Vosmerikov S. V., Veremey I. S., Lyakhov N. Z.** Mechanochemical modification of tin bronzes with intermetallide Cu_9Al_4 74

AGRARIAN SCIENCES

- Lovkis Z. V.** Experimental determination of the parameters of the hydraulic transport system of fruit and vegetables 83

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

МАТЕМАТИКА
MATHEMATICS

УДК 517.958:537.8
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-7-13>

Поступило в редакцию 11.08.2022
Received 11.08.2022

В. Т. Ерофеенко, И. С. Козловская

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УЗКИХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
С ОСЕВОЙ СИММЕТРИЕЙ НА ПЛОСКОСТИ**

(Представлено академиком Ю. С. Хариным)

Аннотация. Разработана математическая модель узких пучков монохроматических электромагнитных волн, распространяющихся в вакууме. Построены пучки электромагнитных волн с порядком осевой симметрии m ($m = 0, 1, 2, \dots$), характеризуемые радиусом локализации пучка $R_{\text{пуч}}$, параметром узости пучка n ($n \geq 2$) и коэффициентом ослабления пучка N ($N \geq 2$). Численно исследована структура электрического поля ТЕ-поляризованного пучка волн.

Ключевые слова: узкие пучки, порядок симметрии, радиус локализации, монохроматические волны, цилиндрические поля, поляризация пучка

Для цитирования. Ерофеенко, В. Т. Моделирование узких пучков электромагнитных волн с осевой симметрией на плоскости / В. Т. Ерофеенко, И. С. Козловская // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 1. – С. 7–13. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-7-13>

Viktor T. Erofeenko, Inessa S. Kozlovskaja

Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

**MODELING OF NARROW BEAMS OF ELECTROMAGNETIC WAVES
WITH AXIAL SYMMETRY ON A PLANE**

(Communicated by Academician Yuriy S. Kharin)

Abstract. A mathematical model of narrow beams of monochromatic electromagnetic waves propagating in vacuum is developed. Beams of electromagnetic waves are constructed with the order of axial symmetry m ($m = 0, 1, 2, \dots$), characterized by the beam localization radius R_{beam} , the beam narrowness parameter n ($n \geq 2$), and the beam attenuation coefficient N ($N \geq 2$). The structure of the electric field for a TE-polarized wave beam is studied numerically.

Keywords: narrow beam, order symmetry, radius localization, monochromatic waves, cylindrical fields, polarization of the beam

For citation. Erofeenko V. T., Kozlovskaja I. S. Modeling of narrow beams of electromagnetic waves with axial symmetry on a plane. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 1, pp. 7–13 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-7-13>

Введение. Пучки электромагнитных волн используются для передачи информации и для воздействия на электронное оборудование технических устройств. Изучаются пучки с различной геометрической структурой в различных диапазонах частот: гауссовы [1], Лагерра–Гаусса [2], сингулярные [3; 4], оптические [1; 3], пучки в специальных средах [1; 5] и др. Значительное внимание уделяется разработке методов решения задач экранирования полей пучков экранами из различных материалов: метаматериалов [2], биизотропных [6], магнитодиэлектрических [7] и др. В предлагаемой работе разработан класс узких пучков электромагнитных волн, обобща-

ющих гауссовы пучки. Электромагнитное поле пучков представлено в интегральном виде через базисные цилиндрические электромагнитные поля [8] с плотностью, характеризующей узость пучков. Плотность вычислена аналитически и выражена через радиус локализации пучка, параметр узости и коэффициент ослабления пучка с заданным порядком осевой симметрии.

Структура TE -поляризованных узких пучков электромагнитных волн. Построим узкий TE -поляризованный пучок электромагнитных волн с осевой симметрией порядка m ($m = 0, 1, 2, \dots$), который излучается плоскостью $z = 0$ в полупространство $D_0(z \geq 0)$ из вакуума.

Пучок представим в цилиндрической системе координат $\vec{\rho} = (\rho, \varphi, z)$ в интегральном виде через базисные цилиндрические поля.

$$\vec{\mathbf{E}}_{\text{пуч}}(\vec{\rho}) = \int_0^{\infty} \vec{E}_0(\vec{\rho}; \lambda, k_0) d\lambda, \quad \vec{\mathbf{H}}_{\text{пуч}}(\vec{\rho}) = \int_0^{\infty} \vec{H}_0(\vec{\rho}; \lambda, k_0) d\lambda; \quad 0 \leq \lambda < \infty, 0 \leq \varphi < 2\pi, z \geq 0, \quad (1)$$

$$\vec{E}_0 = a_{\text{пуч}}^{(m)}(\lambda) \vec{M}_m^{(-1)}(\vec{\rho}; \lambda, k_0), \quad \vec{H}_0 = h_0 a_{\text{пуч}}^{(m)}(\lambda) \vec{M}_m^{(-2)}(\vec{\rho}; \lambda, k_0),$$

где $a_{\text{пуч}}^{(m)}(\lambda)$ – плотность пучка; \vec{E}_0, \vec{H}_0 – базисное монохроматическое цилиндрическое электромагнитное поле [8, с. 131], зависящее от параметра λ ; $h_0 = \frac{1}{iZ_0}$, $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$,

$$\vec{M}_m^{(\mp 1)}(\vec{\rho}; \lambda, k_0) = \vec{V}_m^{(1)}(\lambda \rho) e^{\mp v_0(\lambda)z} \Phi_m, \quad \Phi_m = \exp(im\varphi), \quad (2)$$

$$\vec{M}_m^{(\mp 2)}(\vec{\rho}; \lambda, k_0) = \frac{1}{k_0} (\mp v_0(\lambda) \vec{V}_m^{(2)}(\lambda \rho) + \lambda J_m(\lambda \rho) \vec{e}_z) e^{\mp v_0(\lambda)z} \Phi_m,$$

$$\vec{V}_m^{(1)}(\lambda \rho) = \frac{im}{\lambda \rho} J_m(\lambda \rho) \vec{e}_\rho - J'_m(\lambda \rho) \vec{e}_\varphi, \quad \vec{V}_m^{(2)}(\lambda \rho) = J'_m(\lambda \rho) \vec{e}_\rho + \frac{im}{\lambda \rho} J_m(\lambda \rho) \vec{e}_\varphi, \quad (3)$$

$v_0(\lambda) = \sqrt{\lambda^2 - k_0^2}$ при $k_0 \leq \lambda < \infty$, $v_0(\lambda) = -i\sqrt{k_0^2 - \lambda^2}$ при $0 \leq \lambda \leq k_0$, $0 \leq \lambda < \infty$; $\vec{e}_\rho, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$ – орты цилиндрической системы координат; $J_m(\cdot)$ – функции Бесселя; $k_0 = \omega/c$, ω – круговая частота поля, $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ – скорость света; ϵ_0, μ_0 – диэлектрическая и магнитная постоянные.

Для TE -поляризованного пучка (TE -пучка) (1) электрическое поле $\vec{\mathbf{E}}_{\text{пуч}}$ параллельно плоскости Oxy ; $z = z_0$ – плоскость сечения пучка.

Электромагнитное поле (1) удовлетворяет уравнениям Максвелла

$$\text{rot } \vec{\mathbf{E}}_{\text{пуч}} = i\omega\mu_0 \vec{\mathbf{H}}_{\text{пуч}}, \quad \text{rot } \vec{\mathbf{H}}_{\text{пуч}} = -i\omega\epsilon_0 \vec{\mathbf{E}}_{\text{пуч}}$$

в полупространстве $D_0(z \geq 0)$.

Моделирование TE -поляризованных узких пучков волн порядка $m \geq 1$. Рассмотрим TE -пучок (1), для которого электрическое поле на плоскости $z = 0$ сконцентрировано возле начала координат ($x = 0, y = 0$) и экспоненциально затухает при $\rho \rightarrow \infty$. Плоскость Oxy рассматривается как источник пучка волн.

$$\vec{\mathbf{E}}_{\text{пуч}} \Big|_{z=0} = \int_0^{\infty} a_{\text{пуч}}^{(m)}(\lambda) \vec{M}_m^{(-1)}(\vec{\rho}; \lambda, k_0) d\lambda = (f_1(\rho) \vec{e}_\rho + f_2(\rho) \vec{e}_\varphi) \Phi_m, \quad (4)$$

где функция $f_1(\rho)$ имеет вид узкого пучка

$$f_1(\rho) = E_0 \left(\frac{\rho}{R_{\text{пуч}}} \right)^{m-1} e^{-\alpha \rho^n}, \quad 0 \leq \rho < \infty, \quad (5)$$

где $\alpha = \frac{\ln(N)}{R_{\text{пуч}}^n}$; $E_0 - \text{const}$; $[E_0] = \frac{\text{В}}{\text{м}}$; $R_{\text{пуч}}$ – радиус локализации пучка; N – коэффициент ослабления пучка ($N \geq 2$); n – параметр узости пучка ($n \geq 2$); при $n = 2$ образуется гауссов пучок волн, при $n = 3, 4, \dots$ формируются узкие пучки волн.

Т е о р е м а 1. Плотность $a_{\text{пуч}}^{(m)}$ узкого ТЕ-поляризованного пучка электромагнитных волн (1) порядка $m = 1, 2, 3, \dots$ определяется формулами:

$$a_{\text{пуч}}^{(m)}(\lambda) = iE_0 R_{\text{пуч}} G_n^{(m)}(\lambda), \quad (6)$$

где

$$G_n^{(m)}(\lambda) = \frac{1}{nm} 2^{m+2} (\beta_n)^m \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1} (\beta_n R_{\text{пуч}} \lambda)^{2k+m+1}}{k!(k+m)!} \Gamma\left(\frac{2k+2m+2}{n}\right), \quad \beta_n = \frac{1}{2\sqrt[n]{\ln(N)}}.$$

Д о к а з а т е л ь с т в о. Вычислим электрическое поле (4) на плоскости $z = 0$, используя (2), (3):

$$\vec{E}_{\text{пуч}} \Big|_{z=0} = \int_0^{\infty} a_{\text{пуч}}^{(m)}(\lambda) \left(\frac{im}{\lambda \rho} J_m(\lambda \rho) \vec{e}_\rho - J'_m(\lambda \rho) \vec{e}_\varphi \right) d\lambda \Phi_m = (f_1(\rho) \vec{e}_\rho + f_2(\rho) \vec{e}_\varphi) \Phi_m. \quad (7)$$

Обозначим

$$\bar{a}(\lambda) = \frac{im}{\lambda^2} a_{\text{пуч}}^{(m)}(\lambda), \quad (8)$$

тогда из формул (6), (7) и (4) для компонент при \vec{e}_ρ следует равенство

$$E_0 \frac{\rho^m}{R_{\text{пуч}}^{m-1}} e^{-\alpha \rho^n} = \int_0^{\infty} \bar{a}(\lambda) J_m(\lambda \rho) \lambda d\lambda. \quad (9)$$

Применим обратное интегральное преобразование Ханкеля, получим

$$\bar{a}(\lambda) = \frac{E_0}{R_{\text{пуч}}^{m-1}} \int_0^{\infty} \rho^{m+1} e^{-\alpha \rho^n} J_m(\lambda \rho) d\rho. \quad (10)$$

Вычислим интеграл (10), используя представление функции Бесселя $J_m(\lambda \rho)$ в виде ряда [8, с. 288]. Тогда

$$\bar{a}(\lambda) = \frac{E_0}{R_{\text{пуч}}^{m-1}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \lambda^{m+2k}}{k!(k+m)! 2^{m+2k}} \int_0^{\infty} e^{-\alpha \rho^n} \rho^{2m+2k+1} d\rho. \quad (11)$$

Для вычисления интеграла (11) преобразуем интегральную формулу для гамма-функции

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt = [t = \alpha x^n] = n \alpha^z \int_0^{\infty} x^{nz-1} e^{-\alpha x^n} dx.$$

Обозначим $nz - 1 = s$, $z = \frac{s+1}{n}$, тогда получим формулу

$$\int_0^{\infty} x^s e^{-\alpha x^n} dx = \frac{1}{n \alpha^{\frac{s+1}{n}}} \Gamma\left(\frac{s+1}{n}\right). \quad (12)$$

Учитывая (12) в (11), получим разложение

$$\begin{aligned} \bar{a}(\lambda) &= \frac{E_0}{R_{\text{пуч}}^{m-1}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \lambda^{m+2k}}{k!(k+m)! 2^{m+2k}} \frac{1}{n(\sqrt[n]{\alpha})^{2k+2m+2}} \Gamma\left(\frac{2k+2m+2}{n}\right) = \\ &= \frac{mE_0}{\lambda^2} \frac{4}{nm R_{\text{пуч}}^{m-1} (\sqrt[n]{\alpha})^m} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \lambda^{2k+m+2}}{k!(k+m)! (2\sqrt[n]{\alpha})^{2k+m+2}} \Gamma\left(\frac{2k+2m+2}{n}\right). \end{aligned} \quad (13)$$

Определим радиус $R_{\text{пуч}}$ локализации пучка (5). Экспоненциальная амплитуда пучка (5) на плоскости $z = 0$ имеет вид $A(\rho) = e^{-\alpha \rho^n}$. Предположим, что амплитуда на радиусе $A(R_{\text{пуч}})$ в N ($N \geq 2$) раз меньше по сравнению с амплитудой $A(0)$ в центральной точке $\rho = 0$. При $\rho = 0$ $A(0) = 1$, при $\rho = R_{\text{пуч}}$ имеем $A(R_{\text{пуч}}) = e^{-\alpha R_{\text{пуч}}^n}$, тогда $\frac{A(0)}{A(R_{\text{пуч}})} = e^{\alpha R_{\text{пуч}}^n} = N$. Следует $\alpha = \frac{\ln(N)}{R_{\text{пуч}}^n}$, $\sqrt[n]{\alpha} = \frac{1}{2\beta_n R_{\text{пуч}}}$,

$$\beta_n = \frac{1}{2\sqrt[n]{\ln(N)}}.$$

В результате разложение (13) преобразуется к виду

$$\bar{a}(\lambda) = -\frac{mE_0}{\lambda^2} R_{\text{пуч}} G_n^{(m)}(\lambda), \quad (14)$$

где $G_n^{(m)}(\lambda) = \frac{1}{nm} 2^{m+2} (\beta_n)^m \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1} (\beta_n R_{\text{пуч}} \lambda)^{2k+m+1}}{k!(k+m)!} \Gamma\left(\frac{2k+2m+2}{n}\right)$.

Сопоставляя (8) с (14), получим искомую формулу (6). ■

Вычислим $f_2(\rho)$, сравнивая компоненты при \bar{e}_φ в равенстве (7). Используя (8), представим

$$f_2(\rho) = -\int_0^\infty a_{\text{пуч}}^{(m)}(\lambda) J'_m(\lambda\rho) d\lambda = -\int_0^\infty a_{\text{пуч}}^{(m)}(\lambda) \frac{d}{\lambda d\rho} J_m(\lambda\rho) d\lambda = \frac{i}{m} \frac{d}{d\rho} \int_0^\infty \bar{a}(\lambda) J_m(\lambda\rho) \lambda d\lambda.$$

Учитывая (9), получим формулу

$$f_2(\rho) = iE_0 \frac{\rho^{m-1}}{R_{\text{пуч}}^{m-1}} \left(1 - \ln(N) \frac{n}{m} \frac{\rho^n}{R_{\text{пуч}}^n}\right) \exp\left[-\ln(N) \left(\frac{\rho}{R_{\text{пуч}}}\right)^n\right]. \quad (15)$$

Моделирование TE -поляризованных узких пучков электромагнитных волн порядка $m = 0$.

Рассмотрим поле TE -пучка с порядком осевой симметрии $m = 0$ (осесимметричное поле, поле не зависит от координаты φ). Электрическое поле (1) на плоскости $z = 0$, сконцентрированное возле начала координат ($x = 0, y = 0$), представим в виде

$$\bar{\mathbf{E}}_{\text{пуч}} \Big|_{z=0} = \int_0^\infty a_{\text{пуч}}^{(0)}(\lambda) \bar{M}_0^{(-1)}(\bar{\rho}; \lambda, k_0) d\lambda = f_0(\rho) \bar{e}_\varphi, \quad (16)$$

где функция $f_1(\rho)$ имеет вид узкого пучка

$$f_0(\rho) = E_0 \frac{\rho}{R_{\text{пуч}}} e^{-\alpha\rho^n}, \quad \alpha = \frac{\ln(N)}{R_{\text{пуч}}^n}, \quad 0 \leq \rho < \infty. \quad (17)$$

Т е о р е м а 2. Плотность $a_{\text{пуч}}^{(0)}$ узкого пучка электромагнитных волн порядка $m = 0$ определяется формулами:

$$a_{\text{пуч}}^{(0)}(\lambda) = E_0 R_{\text{пуч}} G_n(\lambda), \quad (18)$$

где

$$G_n(\lambda) = \frac{8}{n} (\beta_n)^2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (\beta_n R_{\text{пуч}} \lambda)^{2k+2}}{k!(k+1)!} \Gamma\left(\frac{2k+4}{n}\right), \quad \beta_n = \frac{1}{2\sqrt[n]{\ln(N)}},$$

для гауссова пучка $G_2(\lambda) = \left(\frac{R_{\text{пуч}} \lambda}{2\ln(N)}\right)^2 \exp\left[-\frac{(R_{\text{пуч}} \lambda)^2}{4\ln(N)}\right]$.

Д о к а з а т е л ь с т в о. Преобразуем электрическое поле (16), используя (2), (3). Получим равенство

$$\int_0^\infty a_{\text{пуч}}^{(0)}(\lambda) J_1(\lambda\rho) d\lambda = f_0(\rho). \quad (19)$$

Обозначим

$$\bar{a}(\lambda) = \frac{1}{\lambda} a_{\text{пуч}}^{(0)}(\lambda). \quad (20)$$

Тогда, с учетом формул (17), (19), следует равенство

$$E_0 \frac{\rho}{R_{\text{пуч}}} e^{-\alpha\rho^n} = \int_0^\infty \bar{a}(\lambda) J_1(\lambda\rho) \lambda d\lambda.$$

Применим обратное интегральное преобразование Ханкеля, получим

$$\bar{a}(\lambda) = \frac{E_0}{R_{\text{пуч}}} \int_0^\infty \rho^2 e^{-\alpha \rho^n} J_1(\lambda \rho) d\rho. \quad (21)$$

Вычислим интеграл (21), используя представление функции Бесселя $J_1(\lambda \rho)$ в виде ряда:

$$\bar{a}(\lambda) = \frac{E_0}{R_{\text{пуч}}} \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k \lambda^{2k+1}}{k!(k+1)! 2^{2k+1}} \int_0^\infty e^{-\alpha \rho^n} \rho^{2k+3} d\rho. \quad (22)$$

На основании формулы (12) вычислим интеграл (22). Получим

$$\bar{a}(\lambda) = \frac{E_0}{R_{\text{пуч}}} \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k \lambda^{2k+1}}{k!(k+1)! 2^{2k+1}} \frac{1}{n(\sqrt[n]{\alpha})^{2k+4}} \Gamma\left(\frac{2k+4}{n}\right). \quad (23)$$

Вводя обозначение $\beta_n = \frac{1}{2\sqrt[n]{\ln(N)}}$ формулу (23) преобразуем к виду

$$\bar{a}(\lambda) = E_0 R_{\text{пуч}} \frac{8}{n\lambda} (\beta_n)^2 \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k (\beta_n R_{\text{пуч}} \lambda)^{2k+2}}{k!(k+1)!} \Gamma\left(\frac{2k+4}{n}\right). \quad (24)$$

Подставляя (24) в (20), получим искомую формулу (18). ■

Электрическое поле пучка в сечении на $z = z_0$ определяется формулой

$$\vec{E}_{\text{пуч}} \Big|_{z=z_0} = \int_0^{k_0} a_{\text{пуч}}^{(0)}(\lambda) J_1(\lambda \rho) e^{i\sqrt{k_0^2 - \lambda^2} z_0} d\lambda + \int_{k_0}^\infty a_{\text{пуч}}^{(0)}(\lambda) J_1(\lambda \rho) e^{-\sqrt{\lambda^2 - k_0^2} z_0} d\lambda.$$

Численное исследование TE-пучков электромагнитных волн порядка $m = 0$. Рассмотрим TE-поляризованное электрическое поле (16) узкого пучка на плоскости $z = 0$.

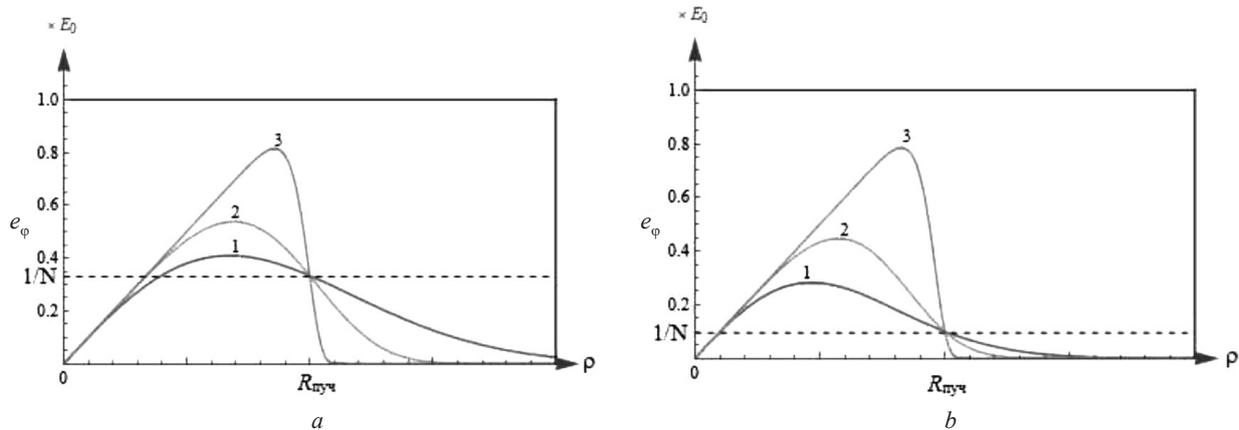
$$\vec{E}_{\text{пуч}} \Big|_{z=0} = E_0 e_\varphi(\rho) \vec{e}_\varphi, \quad e_\varphi(\rho) = \frac{\rho}{R_{\text{пуч}}} \exp\left(-\ln(N) \left(\frac{\rho}{R_{\text{пуч}}}\right)^n\right).$$

Вычислим поле $e_\varphi(\rho)$ при различных значениях параметров n, N (рисунок).

Сингулярный TE-поляризованный пучок электромагнитных волн. Для сингулярного пучка порядок симметрии $m = 1$. Определим электрическое поле сингулярного пучка на плоскости $z = 0$, учитывая формулы (4), (5), (15),

$$\vec{E}_{\text{пуч}} \Big|_{z=0} = E_0 (\vec{e}_\rho + if(\bar{\rho}) \vec{e}_\varphi) F(\bar{\rho}) \exp(i\varphi),$$

где $F(\bar{\rho}) = \exp(-\ln(N)(\bar{\rho})^n)$; $f(\bar{\rho}) = 1 - n \ln(N)(\bar{\rho})^n$; $\bar{\rho} = \frac{\rho}{R_{\text{пуч}}}$.



Графики напряженности электрического поля $e_\varphi(\rho)$ узкого пучка в зависимости от параметра узости пучка: $1 - n = 2$; $2 - n = 4$; $3 - n = 20$ и коэффициента ослабления пучка: $a - N = 3$, $b - N = 10$

Electric field strength $e_\varphi(\rho)$ of a narrow beam vs. beam narrowness parameter: $1 - n = 2$; $2 - n = 4$; $3 - n = 20$ and beam attenuation: $a - N = 3$, $b - N = 10$

Вычислим реальное поле

$$\vec{E}_{\text{pe}} \Big|_{z=0} = \text{Re} \vec{E}_{\text{пуч}} \Big|_{z=0} = E_0 (\cos(\varphi) \vec{e}_\rho - f(\bar{\rho}) \sin(\varphi) \vec{e}_\varphi) F(\bar{\rho}) \quad (25)$$

и определим модуль электрического поля (25)

$$E(\bar{x}, \bar{y}) = |\vec{E}_{\text{pe}}| = |E_0| (\cos^2(\varphi) \vec{e}_\rho + f^2(\bar{\rho}) \sin^2(\varphi) \vec{e}_\varphi)^{1/2} F(\bar{\rho}) = \frac{|E_0|}{\bar{\rho}} \sqrt{\bar{x}^2 + f^2(\bar{\rho}) \bar{y}^2} F(\bar{\rho}),$$

где $\bar{\rho} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$, \bar{x}, \bar{y} – безразмерные декартовы координаты; $-1 \leq \bar{x} \leq 1$, $-1 \leq \bar{y} \leq 1$.

В центре пучка $E(0, 0) = |E_0|$. Распределение поля вдоль оси Oz определяется формулами

$$\vec{E}_{\text{пуч}} \Big|_{\rho=0} = -\frac{1}{2} E_0 k_0 R_{\text{пуч}} (I_1(z) + I_2(z)) (\vec{e}_\rho + i \vec{e}_\varphi), \quad z \geq 0,$$

$$I_1(z) = \int_0^1 G_n^{(1)}(k_0 \bar{\lambda}) e^{ik_0 z \sqrt{1-\bar{\lambda}^2}} d\bar{\lambda}, \quad I_2(z) = \int_1^\infty G_n^{(1)}(k_0 \bar{\lambda}) e^{-k_0 z \sqrt{\bar{\lambda}^2-1}} d\bar{\lambda},$$

где функция $G_n^{(1)}(k_0 \bar{\lambda})$ определена в (6).

Заключение. Исследованы электрические поля TE -поляризованных узких пучков электромагнитных волн с различными порядками осевой симметрии m . Представлены графики электрических полей осесимметричных пучков ($m=0$) для различных значений параметра узости n и параметра ослабления пучка N . Показано, что при больших значениях параметра n поле на плоскости источника вне радиуса пучка $R_{\text{пуч}}$ практически отсутствует и возрастает внутри пучка, локализуясь при $\rho = R_{\text{пуч}}$. Рассмотрен сингулярный пучок электромагнитных волн ($m=1$), для которого электрическое поле в центре пучка $\rho=0$ отлично от нуля. Заметим, что для пучков с порядками $m=0$ и $m \geq 2$ электрическое поле в точке $\rho=0$ равно нулю.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 1.4.3 Государственной программы научных исследований «Цифровые и космические технологии, безопасность общества и государства» на 2021–2023 гг.

Acknowledgements. The work has been done within the framework of task 1.4.3 of the State Research Program “Digital and space technologies, security of society and state for 2021–2023”.

Список использованных источников

1. Гончаренко, А. М. Оптические гауссовы пучки и солитоны / А. М. Гончаренко. – Минск, 2011. – 126 с.
2. Ерофеенко, В. Т. Преобразование пучков электромагнитных волн при прохождении через экран из кирального метаматериала / В. Т. Ерофеенко, В. Ф. Бондаренко // Информатика. – 2013. – № 1. – С. 5–17.
3. Кухарчик, П. Д. Полное внутреннее отражение гауссова светового пучка / П. Д. Кухарчик, В. М. Сердюк, И. А. Титовицкий // Журн. техн. физики. – 1999. – Т. 69, № 4. – С. 74–78.
4. Казак, Л. А. Формирование, суперпозиция и устойчивость вихревых оптических пучков различного порядка / Л. А. Казак, А. Л. Толстик // Вестн. БГУ. Сер. 1. Физика. Математика. Информатика. – 2010. – № 2. – С. 3–7.
5. Панов, В. П. О распространении волновых пучков в средах с изотропной комплексной диэлектрической проницаемостью / В. П. Панов, В. В. Приходько // Радиотехника и электроника. – 2007. – Т. 52, № 6. – С. 662–670.
6. Ерофеенко, В. Т. Краевая задача дифракции пучков электромагнитных волн на плоском экране из биизотропных материалов / В. Т. Ерофеенко // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2012. – № 4. – С. 72–79.
7. Ерофеенко, В. Т. Решение задачи экранирования круговых пучков электромагнитных волн плоским магнито-диэлектрическим экраном / В. Т. Ерофеенко, А. И. Урбанович // Тр. XXIX Междунар. конф. «Радиационная физика твердого тела», Севастополь, 8–13 июля 2019 г. – М., 2019. – С. 352–362.
8. Ерофеенко, В. Т. Аналитическое моделирование в электродинамике / В. Т. Ерофеенко, И. С. Козловская. – Минск, 2010. – 303 с.

References

1. Goncharenko A. M. *Optical Gaussian beams and solitons*. Minsk, 2011. 126 p. (in Russian).
2. Erofeenko V. T., Bondarenko V. F. Transformation of beams of electromagnetic waves passing through a chiral metamaterial screen. *Informatika* [Informatics], 2013, no. 1, pp. 5–17 (in Russian).
3. Kukharchik P. D., Serdyuk V. M., Titovitskii I. A. Total Internal Reflection of a Gaussian Light Beam. *Technical Physics*, 1999, vol. 44, no. 4, pp. 417–421. <https://doi.org/10.1134/1.1259312>
4. Kazak L. A., Tolstik A.L. The formation, superposition, and stability of different-order vortex optical beams. *Vestnik BGU. Seriya 1. Fizika, Matematika, Informatika* [Vestnik BSU. Series 1. Physics. Mathematics. Informatics], 2010, no. 2, pp. 3–7 (in Russian).

5. Panov V. P., Prikhodko V. V. On the propagation of wave beams in media with isotropic complex permittivity. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2007, vol. 52, no. 6, pp. 617–625. <https://doi.org/10.1134/s1064226907060022>

6. Erofeenko V. T. Boundary value problem of the diffraction of beams of electromagnetic waves on the flat screen made of biisotropic materials. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2012, no. 4, pp. 72–79 (in Russian).

7. Erofeenko V. T., Urbanovich A. I. Solution of the problems of shielding of the beams of electromagnetic waves by means of plane magnetodielectrical screen. *Trudy XXIX Mezhdunarodnoi konferentsii "Radiatsionnaya fizika tverdogo tela", Sevastopol', 8–13 iyulya 2019 g.* [Works of the XXIX International Conference "Radiative physics of the rigid body", Sevastopol, 08–13 July 2019]. Moscow, 2019, pp. 352–362 (in Russian).

8. Erofeenko V. T., Kozlovskaja I. S. *Analytical Modeling in Electrodynamics*. Minsk, 2010. 303 p. (in Russian).

Информация об авторах

Ерофеенко Виктор Тихонович – д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. НИИ прикладных проблем математики и информатики БГУ (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bsu_erofeenko@tut.by.

Козловская Инесса Станиславовна – канд. физ.-мат. наук, доцент. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kozlovskaja@bsu.by.

Information about the authors

Erofeenko Viktor T. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher. Research Institute for Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bsu_erofeenko@tut.by.

Kozlovskaja Inessa S. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kozlovskaja@bsu.by.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

UDC 517.956.35

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-14-19>

Received 15.09.2022

Поступило в редакцию 15.09.2022

Academician Viktor I. Korzyuk, Jan V. Rudzko*Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***CLASSICAL SOLUTION OF THE INITIAL-VALUE PROBLEM
FOR A ONE-DIMENSIONAL QUASILINEAR WAVE EQUATION**

Abstract. For a one-dimensional mildly quasilinear wave equation given in the upper half-plane, we consider the Cauchy problem. The solution is constructed by the method of characteristics in an implicit analytical form as a solution of some integro-differential equation. The solvability of this equation, as well as the smoothness of its solution, is studied. For the problem in question, the uniqueness of the solution is proved and the conditions under which its classical solution exists are established. When given data is not enough smooth a mild solution is constructed.

Keywords: nonlinear wave equation, Cauchy problem, method of characteristics, fixed-point principle, classical solution.

For citation. Korzyuk V. I., Rudzko J. V. Classical solution of the initial-value problem for a one-dimensional quasilinear wave equation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 1, pp. 14–19. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-14-19>

Академик В. И. Корзюк, Я. В. Рудько*Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***КЛАССИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОШИ
ДЛЯ ОДНОМЕРНОГО КВАЗИЛИНЕЙНОГО ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ**

Аннотация. Для одномерного слабо квазилинейного волнового уравнения, заданного в верхней полуплоскости, рассматривается задача Коши. Решение строится в неявном аналитическом виде как решение некоторого интегро-дифференциального уравнения. Проводится исследование разрешимости этого уравнения, а также гладкости его решения. Для рассматриваемой задачи доказывается единственность решения и устанавливаются условия, при выполнении которых существует ее классическое решение. При недостаточной гладкости начальных данных строится слабое решение.

Ключевые слова: нелинейное волновое уравнение, задача Коши, метод характеристик, принцип неподвижной точки, классическое решение

Для цитирования. Корзюк, В. И. Классическое решение задачи Коши для одномерного квазилинейного волнового уравнения / В. И. Корзюк, Я. В. Рудько // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 1. – С. 14–19. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-14-19>

Introduction. Continuous media are described mainly by nonlinear partial differential equations. The choice of linear or nonlinear equations for describing a medium depends on the role played by nonlinear effects and is determined by the specific physical situation. For example, when describing the propagation of laser pulses, it is necessary to take into account the dependence of the refractive index of the medium on the electromagnetic field intensity.

The linearization of nonlinear equations of mathematical physics does not always lead to meaningful results. It may turn out that the linearized equations apply to the physical process in question only for some finite time. Moreover, from the viewpoint of physics, it is often “essentially nonlinear” solutions, qualitatively different from the solutions of linear equations, that are extremely important for nonlinear equations of mathematical physics. These can be stationary solutions of the soliton type, localized in one or several dimensions, or solutions of the wave collapse type, which describe the spontaneous concentration of energy in small regions of space [1].

The solvability in some function spaces of the Cauchy problem and boundary value problems is established for a wide class of weakly nonlinear hyperbolic equations of the form [2]

$$(\partial_t^2 - \Delta)u(t, \mathbf{x}) = f(t, \mathbf{x}, u(t, \mathbf{x}), \partial_t u(t, \mathbf{x}), \nabla u(t, \mathbf{x})), t > 0, \mathbf{x} \in \Omega \subseteq \mathbb{R}^n.$$

We note that various fixed-point theorems and the method of successive approximations are often used to find solutions to nonlinear equations. For example, Banach’s fixed point theorem was successfully used to obtain a weak solution to the Cauchy problem for a mildly nonlinear wave equation with a nonlinearity of the form $f(\nabla u, \partial_t u, u)$ [3]. In the paper [4], the method of successive approximations was used to construct a twice continuously differentiable solution of the Cauchy problem on a finite time interval for the nonlinear wave equation with a nonlinearity of the form $G'(|u|)u$ with a certain smoothness and boundedness of the nonlinearity G , initial functions, and their derivatives; moreover, under additional conditions on the nonlinearity, the solution is determined in some cone. In the article [5], an auxiliary system with a viscosity parameter was used to build weak solutions for a quasilinear wave equation. A priori estimates and the method of characteristics were used to construct a strong generalized solution for a wave equation with a dissipative term (a nonlinearity of the form $g(t, x, u)\partial_t u$) [6].

We can see that the Cauchy problem is mostly studied with infinitely differentiable small [7–11] or slowly decaying data [12]. It is mainly due to the methods of study and the function spaces where the solution is sought.

In the present article, we use a fixed point principle to solve the Cauchy problem for a nonlinear inhomogeneous hyperbolic equation of the second order. We also derive conditions under which the solution of the Cauchy problem will be classical. Moreover, we do not assume that the initial data of the problem are infinitely differentiable and/or small but take them sufficiently smooth, namely, from the classes C^2 and C^1 . In the future, we will use the obtained results to study initial-boundary value problems.

Statement of the problem. In the domain $(0, \infty) \times \mathbb{R}$ of two independent variables $(t, x) \in (0, \infty) \times \mathbb{R} \subset \mathbb{R}^2$, consider the one-dimensional nonlinear equation

$$\partial_t^2 u(t, x) - a^2 \partial_x^2 u(t, x) + f(t, x, u(t, x), \partial_t u(t, x), \partial_x u(t, x)) = F(t, x), (t, x) \in (0, \infty) \times \mathbb{R}, \quad (1)$$

where $a \in (0, \infty)$, F is a function given on the set $[0, \infty) \times \mathbb{R}$, f is a function given on the set $[0, \infty) \times \mathbb{R}^4$. Equation (1) is equipped with the initial condition

$$u(0, x) = \phi(x), \quad \partial_t u(0, x) = \psi(x), \quad x \in \mathbb{R}, \quad (2)$$

where ϕ and ψ are some real-valued functions defined on the real axis.

It should be noted that Equation (1) can be reduced to a first-order semilinear hyperbolic system

$$\begin{cases} \partial_t u(t, x) = q(t, x), \\ \partial_t p(t, x) - \partial_x q(t, x) = 0, \\ \partial_t q(t, x) - a^2 \partial_x p(t, x) = F(t, x) - f(t, x, u(t, x), p(t, x), q(t, x)), \end{cases}$$

with respect to the unknown functions u , $q = \partial_t u$, and $p = \partial_x u$, and weak solutions of the original problem correspond to the so-called solutions in the broad sense for the equivalent system. Results on the existence and uniqueness of such solutions for general semilinear hyperbolic systems are well known and presented in the works [13; 14]. However, in these papers, generally speaking, only local solutions are established. They will be global classical provided they are bounded in any characteristic triangle and the given functions f , F , ϕ , ϕ' , and ψ are continuously differentiable. And the answer to the question “What conditions must be imposed on these functions to obtain global classical solutions?” is not available in [13; 14].

Some explicit conditions for the existence of a local classical solution to the problem (1)–(2) are given in the book [15] and article [16].

In contrast to many works devoted to the Cauchy problem, we will not assume the initial data of the problem to be infinitely differentiable and/or small but take them sufficiently smooth, namely, $F \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R})$, $f \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R}^4)$, $\phi \in C^2(\mathbb{R})$, and $\psi \in C^1(\mathbb{R})$.

Integro-differential equation. Introduce into consideration the operator K acting by the formula

$$K[u](t, x) = \frac{\phi(x-at) + \phi(x+at)}{2} + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{x+at} \psi(\xi) d\xi + \frac{1}{2a} \int_0^t d\tau \int_{x-a(t-\tau)}^{x+a(t-\tau)} (F(\tau, \xi) - f(\tau, \xi, u(\tau, \xi), \partial_t u(\tau, \xi), \partial_x u(\tau, \xi))) d\xi, \quad (t, x) \in [0, \infty) \times \mathbb{R}. \quad (3)$$

In the closure $[0, \infty) \times \mathbb{R}$ of the domain $(0, \infty) \times \mathbb{R}$, we consider the nonlinear integro-differential equation

$$u(t, x) = K[u](t, x), \quad (t, x) \in [0, \infty) \times \mathbb{R}. \quad (4)$$

L e m m a 1. Let the conditions $F \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R})$, $f \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R}^4)$, $\phi \in C^2(\mathbb{R})$, and $\psi \in C^1(\mathbb{R})$ be satisfied. The function u is a continuous-differentiable solution of Equation (4) if it is a classical solution of the initial-value problem (1), (2).

P r o o f. See [17].

Lemma 1 can also be proved using the method of characteristics [18] or Green's theorem.

L e m m a 2. Let the conditions $F \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R})$, $f \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R}^4)$, $\phi \in C^2(\mathbb{R})$, and $\psi \in C^1(\mathbb{R})$ be satisfied. The function u belongs to the class $C^2([0, \infty) \times \mathbb{R})$ and satisfies Equation (1) and conditions (2) if it is a continuous-differentiable solution of Equation (4).

P r o o f. If the function u is a continuous-differentiable solution of Equation (4), then, by virtue of the smoothness conditions $F \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R})$, $f \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R}^4)$, $\phi \in C^2(\mathbb{R})$, and $\psi \in C^1(\mathbb{R})$, similarly to [19; 20], we conclude that $u \in C^2([0, \infty) \times \mathbb{R})$. Substituting the representations (4) into (1) and (2), we verify that the function u satisfies Equation (1) in $(0, \infty) \times \mathbb{R}$ and conditions (2) in \mathbb{R} . The proof of the lemma is complete.

T h e o r e m 1. Let the conditions $F \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R})$, $f \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R}^4)$, $\phi \in C^2(\mathbb{R})$ and $\psi \in C^1(\mathbb{R})$ be satisfied. The function u belongs to the class $C^2([0, \infty) \times \mathbb{R})$ and satisfies Equation (1) and conditions (2) if and only if it is a continuous-differentiable solution of Equation (4).

The proof of the theorem follows from Lemmas 1 and 2.

For definiteness, we define the topology of the Fréchet space $C^j([0, T] \times \mathbb{R})$ by a countable family of seminorms $\mathfrak{p}_m = \|\cdot\|_{C^j(\Omega_m)}$, $m \in \mathbb{N} \cap [\text{ceil}(aT + 1), \infty)$, where

$$\Omega_m = \text{Conv}\{(0, -m), (0, m), (T, aT - m), (T, aT + m)\}.$$

T h e o r e m 2. Let the conditions $F \in C([0, \infty) \times \mathbb{R})$, $f \in C([0, \infty) \times \mathbb{R}^4)$, $\phi \in C^1(\mathbb{R})$ and $\psi \in C(\mathbb{R})$ be satisfied, and let the function f satisfy the Lipschitz condition with constant L with respect to the three last variables, i. e., $|f(t, x, z_1, z_2, z_3) - f(t, x, w_1, w_2, w_3)| \leq L(|z_1 - w_1| + |z_2 - w_2| + |z_3 - w_3|)$. Then the operator $K : C^1(\Omega_m) \mapsto C^1(\Omega_m)$, acting by the formula (3), is \mathcal{L} -Lipschitz, where $\mathcal{L} = 3L \max\{T, T^2\} \times \max\{1, a^{-1}\}$.

P r o o f. Direct verification.

C o r o l l a r y 1. Let the conditions $F \in C([0, \infty) \times \mathbb{R})$, $f \in C([0, \infty) \times \mathbb{R}^4)$, $\phi \in C^1(\mathbb{R})$ and $\psi \in C(\mathbb{R})$ be satisfied, let the function f satisfy the Lipschitz condition with constant L with respect to the three last variables, and let $T < \min\{1, (3L \max\{1, a^{-1}\})^{-1}\}$. Then the operator $K : C^1([0, T] \times \mathbb{R}) \mapsto C^1([0, T] \times \mathbb{R})$, acting by the formula (3), is \mathfrak{p}_m -contraction for any $m \in \mathbb{N} \cap [\text{ceil}(aT + 1), \infty)$.

Theorem 2.2 from [21] now implies the existence of a unique fixed point, which is the unique solution of (4).

C o r o l l a r y 2. Let the conditions $F \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R})$, $f \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R}^4)$, $\phi \in C^1(\mathbb{R})$ and $\psi \in C(\mathbb{R})$ be satisfied, let the function f satisfy the Lipschitz condition with constant L with respect to the three last variables, and let $T < \min\{1, (3L \max\{1, a^{-1}\})^{-1}\}$. Then there exists a unique solution of Equation (4) in the class $C^1([0, T] \times \mathbb{R})$.

Classical solution. We have therefore built a unique classical solution $u^{(0)}$ of (1), (2) on $[0, T] \times \mathbb{R}$ provided $F \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R})$, $f \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R}^4)$, $\phi \in C^2(\mathbb{R})$, $\psi \in C^1(\mathbb{R})$, f is Lipschitz continuous

with constant L with respect to the three last variables, and $T = \min\{1, (3L \max\{1, a^{-1}\})^{-1}\} / 2$. Now we can extend the solution to the time intervals $[nT, (n+1)T]$, $n \in \mathbb{N}$, using matching conditions

$$u^{(n)}(nT, x) = u^{(n-1)}(nT, x), \partial_t u^{(n)}(nT, x) = \partial_t u^{(n-1)}(nT, x), x \in \mathbb{R}. \tag{5}$$

Differentiating equalities (5) with respect to x , we obtain

$$\begin{aligned} \partial_x u^{(n)}(nT, x) &= \partial_x u^{(n-1)}(nT, x), \partial_x^2 u^{(n)}(nT, x) = \partial_x^2 u^{(n-1)}(nT, x), \\ \partial_x \partial_t u^{(n)}(nT, x) &= \partial_x \partial_t u^{(n-1)}(nT, x), x \in \mathbb{R}. \end{aligned} \tag{6}$$

We express the quantities $\partial_t^2 u^{(j)}(nT, x)$, $j \in \{n-1, n\}$ from Equation (1)

$$\begin{aligned} \partial_t^2 u^{(j)}(nT, x) &= F(nT, x) - a^2 \partial_x^2 u^{(j)}(nT, x) + \\ &+ f(t, x, u^{(j)}(nT, x), \partial_t u^{(j)}(nT, x), \partial_x u^{(j)}(nT, x)), x \in \mathbb{R}. \end{aligned} \tag{7}$$

By virtue of (5) and (6) and the continuity of the functions f and F in expression (7), the right-hand sides are equal for $j = n-1$ and $j = n$, then the left-hand sides are also equal. Conditions (5)–(7) mean that the function

$$u^{(n-1,n)}(t, x) = \begin{cases} u^{(n-1)}(t, x), & (t, x) \in [(n-1)T, nT] \times \mathbb{R}, \\ u^{(n)}(t, x), & (t, x) \in [nT, (n+1)T] \times \mathbb{R}, \end{cases}$$

belongs to the class $C^2([(n-1)T, (n+1)T] \times \mathbb{R})$ and satisfies Equation (1) on the set $[(n-1)T, (n+1)T] \times \mathbb{R}$. We note that another choice of matching conditions (5) will cause at least one of the functions $u^{(n-1,n)}$ or $\partial_t u^{(n-1,n)}$ to be discontinuous, which will entail $u^{(n-1,n)} \notin C^2([(n-1)T, (n+1)T] \times \mathbb{R})$.

Similarly, we conclude that the function

$$u^{(\infty)}(t, x) = u^{(n)}(t, x), (t, x) \in [nT, (n+1)T] \times \mathbb{R},$$

belongs to the class $C^2([0, \infty) \times \mathbb{R})$ and satisfies Equation (1) on the set $[0, \infty) \times \mathbb{R}$ and the Cauchy conditions (2) by construction. We state the result as the following assertion.

Theorem 3. *Let the conditions $F \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R})$, $f \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R}^4)$, $\phi \in C^2(\mathbb{R})$, and $\psi \in C^1(\mathbb{R})$ be satisfied, and let the function f satisfy the Lipschitz condition with constant L with respect to the three last variables. Then the Cauchy problem (1), (2) has a unique solution in the class $C^2([0, \infty) \times \mathbb{R})$.*

Mild solution. If the given functions of the problem (1), (2) do not satisfy the smoothness conditions specified in Theorem 3, then we can speak of mild, weak, and generalized solutions instead of the classical ones.

Definition 1. A function $u \in C^1([0, \infty) \times \mathbb{R})$ is called a mild solution of the problem (1), (2) if it satisfies Equation (4).

Remark 1. Obviously, any classical solution of the problem (1), (2) is a mild solution of this problem too. In its turn, if a mild solution of problem (1), (2) belongs to the class $C^2([0, \infty) \times \mathbb{R})$, then it will be a classical solution of that problem.

We obtain the following result by repeating the arguments of the previous section.

Theorem 4. *Let the conditions $F \in C([0, \infty) \times \mathbb{R})$, $f \in C([0, \infty) \times \mathbb{R}^4)$, $\phi \in C^1(\mathbb{R})$ and $\psi \in C(\mathbb{R})$ be satisfied, and let the function f satisfy the Lipschitz condition with constant L with respect to the three last variables. Then the Cauchy problem (1), (2) has a unique mild solution.*

Conclusions. In the present paper, we obtain sufficient conditions under which there exist a unique classical solution and a unique mild solution of the Cauchy problem in a half-plane for a mildly quasilinear wave equation. The dependence of the smoothness of the solution on the smoothness of the initial functions is established.

Acknowledgements. The article was published with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the program of the Moscow Center of Fundamental and Applied Mathematics under the agreement No. 075-15-2022-284.

Благодарности. Работа проведена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации программы Московского центра фундаментальной и прикладной математики (соглашение № 075-15-2022-284).

References

1. Prokhorov A. M. [et al.], eds. *Encyclopedia of Physics: in 5 vol.* Moscow, 1992, vol. 3. 642 p. (in Russian).
2. Vinogradov I. M. [et al.], eds. *Encyclopedia of Mathematics: in 5 vol.* Moscow, 1982, vol. 3. 592 p. (in Russian).
3. Evans L. C. *Partial differential equations*. Providence, R. I., 2010. 749 p. <https://doi.org/10.1090/gsm/019>
4. Jörgens K. Das Anfangswertproblem in Großen für eine Klasse nichtlinearer Wellengleichungen. *Mathematische Zeitschrift*, 1961, vol. 77, no. 1, pp. 295–308 (in German). <https://doi.org/10.1007/bf01180181>
5. Caetano F. On the existence of weak solutions to the Cauchy problem for a class of quasilinear hyperbolic equations with a source term. *Revista Matemática Complutense*, 2004, vol 17, no. 1, pp. 147–167. https://doi.org/10.5209/rev_rema.2004.v17.n1.16794
6. Jokhadze O. The Cauchy problem for one-dimensional wave equations with a nonlinear dissipative term. *Eurasian Mathematical Journal*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 92–112.
7. Ta-tsien (li da-qian) L., Da-qian L., Yun-mei C. Initial value problems for nonlinear wave equations. *Communications in Partial Differential Equations*, 1988, vol. 13, no. 4, pp. 383–422. <https://doi.org/10.1080/03605308808820547>
8. Xiao C., Guo F. On the global existence of small data classical solutions to a semilinear wave equation with a time-dependent damping. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2021, vol. 44, no. 18, pp. 14593–14605. <https://doi.org/10.1002/mma.7728>
9. Hidano K., Tsutaya K. Global existence and asymptotic behavior of solutions for nonlinear wave equations. *Indiana University Mathematics Journal*, 1995, vol. 44, no. 4, pp. 1273–1305. <https://doi.org/10.1512/iumj.1995.44.2028>
10. Tzvetkov N. Existence of global solutions to nonlinear massless Dirac system and wave equations with small data. *Tsukuba Journal of Mathematics*, 1998, vol. 22, no. 1, pp. 198–211. <https://doi.org/10.21099/tkbjm/1496163480>
11. Li Y. C. Classical solutions to fully nonlinear wave equations with dissipation terms. *Chinese Annals of Mathematics*, 1996, vol. 17A, pp. 451–466.
12. Ikeda M., Inui T., Wakasugi Y. The Cauchy problem for the nonlinear damped wave equation with slowly decaying data. *Nonlinear Differential Equations and Applications NoDEA*, 2017, vol. 24, no. 2, art. 10, pp. 451–466. <https://doi.org/10.1007/s00030-017-0434-1>
13. Friedrichs K. O. Nonlinear hyperbolic differential equations for functions of two independent variables. *American Journal of Mathematics*, 1948, vol. 70, no. 3, pp. 555–589. <https://doi.org/10.2307/2372200>
14. Rozhdestvenskii B. L., Yanenko N. N. *Systems of quasilinear equations and their applications to gas dynamics*. Providence, R. I., 1983. 676 p.
15. Li T., Zhou Y. *Nonlinear Wave Equations*. Berlin, Heidelberg, 2017. 407 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55725-9>
16. Havlová J. Periodic solutions of a nonlinear telegraph equation. *Časopis pro pěstování matematiky*, 1965, vol. 90, no. 3, pp. 273–289. <https://doi.org/10.21136/cpm.1965.108760>
17. Korzyuk V. I., Rudzko J. V. Classical solution of the initial-value problem for a one-dimensional quasilinear wave equation. *XX Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya po differentsial'nym uravneniyam (Eryuginskije chteniya–2022): Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Novopolotsk, 31 maya – 03 iyunya 2022 g. Chast' 2 [XX International Scientific Conference on Differential Equations (Erugin Readings–2022): Proceedings of the International Scientific Conference, Novopolotsk, May 31 – June 03, 2022. Part 2]*. Novopolotsk, 2022, pp. 38–39.
18. Korzyuk V. I., Rudzko J. V. Classical solution of the first mixed problem for the telegraph equation with a nonlinear potential. *Differential Equations*, 2022, vol. 58, no. 2, pp. 175–186. <https://doi.org/10.1134/s0012266122020045>
19. Korzyuk V. I., Stolyarchuk I. I. Classical solution of the first mixed problem for the Klein–Gordon–Fock equation in a half-strip. *Differential Equations*, 2014, vol. 50, no. 8, pp. 1098–1111. <https://doi.org/10.1134/s0012266114080084>
20. Korzyuk V. I., Stolyarchuk I. I. Classical solution of the first mixed problem for second-order hyperbolic equation in curvilinear half-strip with variable coefficients. *Differential Equations*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 74–85. <https://doi.org/10.1134/s0012266117010074>
21. Cain G. L., Jr., Nashed M. Z. Fixed points and stability for a sum of two operators in locally convex spaces. *Pacific Journal of Mathematics*, 1971, vol. 39, no. 3, pp. 581–592. <https://doi.org/10.2140/pjm.1971.39.581>

Information about the authors

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

Rudzko Jan V. – Postgraduate Student. Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus (11, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: janycz@yahoo.com. ORCID: 0000-0002-1482-9106.

Информация об авторах

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

Рудько Ян Вячеславович – аспирант. Институт математики НАН Беларуси (ул. Сурганова, 11, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: janycz@yahoo.com. ORCID: 0000-0002-1482-9106.

ИНФОРМАТИКА
INFORMATICSУДК 004
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-20-26>Поступило в редакцию 03.06.2022
Received 03.06.2022**Б. А. Залесский***Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь***АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ,
НАБЛЮДАЕМЫХ ВИДЕОКАМЕРОЙ***(Представлено членом-корреспондентом А. В. Тузиковым)*

Аннотация. Представлен алгоритм обнаружения движущихся объектов, наблюдаемых видеокамерой. Алгоритм основан на обнаружении движения на кадрах видеопотока, полученного в общем случае движущейся видеокамерой, а также на построении и анализе траекторий движущихся объектов. Особенность алгоритма заключается в обнаружении на кадрах связанных областей (кластеров) возможного движения, которые с большой вероятностью принадлежат изображениям движущихся объектов, а затем – нахождению на обнаруженных кластерах точек возможного движения и построении с помощью оптического потока траекторий движения найденных точек. Для обнаружения движущихся объектов используются только гладкие траектории. Остальные траектории удаляются из рассмотрения. Объект считается движущимся на текущем кадре, если в него попадает достаточное число траекторий движущихся точек, найденных на предыдущих кадрах. Представленный алгоритм имеет малую вычислительную сложность, что позволяет использовать его в режиме реального или близкого к реальному времени на малых вычислителях, имеющих только несколько процессоров архитектуры ARM без мощных средств параллельных вычислений типа GPU или нейросетевых процессоров NPU.

Ключевые слова: видеопоток, движущиеся объекты, обнаружение объектов

Для цитирования: Залесский, Б. А. Алгоритм обнаружения движущихся объектов, наблюдаемых видеокамерой / Б. А. Залесский // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 1. – С. 20–26. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-20-26>

Boris A. Zalesky*United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***ALGORITHM FOR DETECTION OF MOVING OBJECTS OBSERVED BY A VIDEO CAMERA***(Communicated by Corresponding Member Alexander V. Tuzikov)*

Abstract. An algorithm to detect moving objects captured by a moving video camera is presented. The algorithm is based on detection of motion on video frames taken by a moving video camera, as well as on finding and analyzing the trajectories of moving objects. A feature of the algorithm is detection on frames of connected areas (clusters) of possible object motion. Then moving points on the detected clusters are found, and those points trajectories are built with help of the optical flow. The trajectories are used as features of moving objects. Only smooth trajectories are exploited for detection of moving objects, and the remaining ones are removed from consideration. An object is considered as moving on the current frame if it contains ends of a sufficient number of trajectories of moving points found on previous frames. The presented algorithm has a low computational complexity, which allows it to be used in real or near real time on small computers that have only a few processors of the ARM architecture without powerful parallel computing tools such as GPUs or neural network processors NPU.

Keywords: video stream, moving objects, object detection

For citation. Zalesky B. A. Algorithm for detection of moving objects observed by a video camera. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 1, pp. 20–26 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-20-26>

Введение. Рассматривается задача обнаружения движущихся объектов на кадрах видеопотока, получаемого в общем случае движущейся камерой.

В последние годы значительно возрос интерес к алгоритмам обнаружения объектов на кадрах видеопотока. Это объясняется, с одной стороны, расширением сферы применения средств видеонаблюдения и навигации с использованием видеокамер различного типа, а с другой – появлением большого числа новых подходов к решению задачи, позволивших довести надежность и точность обнаружения до уровня, достаточного для практического использования результатов.

Основные подходы к решению поставленной задачи и обзор последних результатов по обнаружению движущихся объектов представлены в [1–3].

Следует отметить, что большая часть новых алгоритмов обнаружения объектов, в том числе движущихся, основана на использовании глубинного обучения и сверточных нейронных сетей (СНС). Однако существует потребность в менее вычислительно трудных алгоритмах, в которых не используются нейронные сети. Например, при эксплуатации малых беспилотных летательных аппаратов (БЛА) или недорогих систем видеонаблюдения, оборудованных маломощными вычислителями с ARM-архитектурой без средств параллельных вычислений типа GPU или нейросетевых процессоров NPU, невозможно применять программные реализации нейросетевых алгоритмов.

Далее представлен алгоритм CAMOD (Cluster Algorithm Moving Objects Detection) обнаружения движущихся объектов на кадрах видеопотока без использования СНС. Представленный алгоритм имеет относительно малую вычислительную сложность, что позволяет использовать его в режиме реального или близкого к реальному времени на малых вычислителях, имеющих только несколько процессоров архитектуры ARM.

Тестирование алгоритма проводилось на видеопоследовательностях, снятых различными видеокамерами, а также на общеизвестном размеченном наборе данных UAVDT.

Алгоритм CAMOD предназначен для обнаружения движущихся объектов на кадрах видеопотока, снятых в том числе движущейся камерой. Это делает возможным его применение на БЛА и других движущихся средствах видеонаблюдения, в том числе оборудованных маломощными вычислителями с архитектурой ARM.

Алгоритм CAMOD ориентирован на работу с полутоновым видеопотоком, кадры которого обозначим через \mathbf{I}_t . Множество пикселей кадра \mathbf{I}_t размера $w \times h$ обозначим через $S = \{(x, y)\}$, $x = 0, \dots, w - 1, y = 0, \dots, h - 1$, а значения яркостей в пикселях $\mathbf{p} \in S$ через $I_t(\mathbf{p})$.

В случае цветного видеопотока алгоритм может применяться отдельно для каждого канала цветного видеопотока, однако это приводит к увеличению вычислительных затрат, но не улучшает его характеристики, поэтому лучше преобразовать кадры в полутоновые изображения.

Во многих алгоритмах-детекторах движения первичное обнаружение движущихся объектов производится с помощью маски движения [2; 3]. Для построения маски движения рассматривается текущий \mathbf{I}_t кадр и один из его близких предшественников, например, \mathbf{I}_{t-1} . Предыдущий кадр \mathbf{I}_{t-1} совмещается с текущим \mathbf{I}_t с помощью проективного преобразования $P_{t-1,t}$ так, чтобы видимые на обоих кадрах неподвижные части сцены совпадали попиксельно (подробно процесс выравнивания кадров описан в [3]). Один из возможных способов построения маски движения для текущего кадра \mathbf{I}_t заключается в бинаризации модуля разности $|P_{t-1,t}\mathbf{I}_{t-1} - \mathbf{I}_t|$, т. е. вычислении для наперед заданного порога τ , $0 < \tau \leq 255$, бинарного изображения $\mathbf{D}(t)$ с яркостями

$$D(t, \mathbf{p}) = \begin{cases} 1, & \text{если } |P_{t-1,t}I_{t-1}(\mathbf{p}) - I_t(\mathbf{p})| \geq \tau \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} .$$

Такой способ построения бинарной маски движения имеет существенный недостаток – из-за погрешности совмещения кадров \mathbf{I}_t и \mathbf{I}_{t-1} , являющихся 2D-изображениями 3D-сцены, с помощью проективного преобразования $P_{t-1,t}$ на маске появляются области ложного движения (данный эффект в оптике называется параллаксом. В меньшей степени он проявляется в случае, когда расстояние до камеры значительно больше глубины сцены). Для уменьшения влияния параллакса в алгоритме CAMOD предложен более сложный подход к построению маски движения. Вначале

строятся две предварительные бинарные маски движения $\mathbf{D}_{\text{low}}(t)$ и $\mathbf{D}_{\text{high}}(t)$ для низкого r_{low} и высокого r_{high} порогов. Затем эти бинарные маски кластеризуются с помощью алгоритма наращивания областей [4]. Напомним, что кластером называется связанное в четырехточечной (восьмиточечной или иной) системе окрестностей множество C пикселей \mathbf{p} таких, что $D(t, \mathbf{p}) = 1$ для каждого пикселя $\mathbf{p} \in C$, и для любого соседнего с \mathbf{p} пикселя $\mathbf{q} \notin C$ значение маски $D(t, \mathbf{q}) = 0$.

На кластерных представлениях масок $\mathbf{CD}_{\text{low}}(t)$ и $\mathbf{CD}_{\text{high}}(t)$ отбрасываются маленькие кластеры, а для оставшихся кластеров вычисляются ограничивающие их прямоугольники. На окончательной маске движения $\mathbf{D}(t)$ оставляются только те кластеры маски $\mathbf{CD}_{\text{low}}(t)$, ограничивающие прямоугольниками которых имеют значительное пересечение (более 95 %) с хотя бы одним прямоугольником, ограничивающим кластер на $\mathbf{CD}_{\text{high}}(t)$. На рисунке *a* приведена обычная маска движения и маска движения (рисунке *b*), построенная предложенным способом.

Кластеры, оставленные на маске движения $\mathbf{D}(t)$, используются для обнаружения и сопровождения движущихся объектов. Для оценки движения объектов на каждом впервые появившемся на маске $\mathbf{D}(t)$ кластере выбирается заданное количество пикселей, траектории движения которых отслеживаются с помощью оптического потока. Если на одной из предыдущих масок $\mathbf{D}_{t-\Delta}$ кластер $C_j(t-\Delta)$ появился впервые, в момент его появления формируется множество, со-

*a**b*

Негативное изображение масок. Обычная маска движения $\mathbf{D}_{\text{low}}(t)$ содержит большие области ложного движения, возникающие из-за параллакса (*a*); маска движения $\mathbf{D}(t)$, построенная предложенным способом (*b*)

Negative image of masks. Usual motion mask $\mathbf{D}_{\text{low}}(t)$ contains large areas of false motion resulting from parallax (*a*); motion mask $\mathbf{D}(t)$ built by the proposed technique (*b*)

стоящее из заданного числа \mathbb{k} равномерно распределенных на нем пикселей $\mathbf{p}_{j,m}(t-\Delta) \in C_j(t-\Delta)$, $0 \leq m < \mathbb{k}$. Каждый пиксел $\mathbf{p}_{j,m}(t-\Delta)$ рассматривается как начальная точка $\mathbf{d}_{j,m}(t-\Delta) = \mathbf{p}_{j,m}(t-\Delta)$, порождающая новую траекторию. В момент времени $t-\Delta+1$ точка $\mathbf{d}_{j,m}(t-\Delta)$ переводится оптическим потоком в точку $\mathbf{d}_{j,m}(t-\Delta+1)$ на следующем кадре $\mathbf{I}_{t-\Delta+1}$ и так далее до точки $\mathbf{d}_{j,m}(t)$ текущего кадра (в общем случае, точки $\mathbf{d}_{j,m}(t)$ имеют рациональные координаты, в отличие от пикселей, имеющих целочисленные). Каждому кластеру $C_j(t-\Delta)$, впервые появившемуся в момент времени $t-\Delta$, соответствует множество наборов точек

$$\{\mathbf{d}_{j,m}(t-\Delta), \mathbf{d}_{j,m}(t-\Delta+1), \dots, \mathbf{d}_{j,m}(t)\}, 0 \leq m < \mathbb{k}, \quad (1)$$

полученных с помощью перевода оптическим потоком образа начальной точки $\mathbf{d}_{j,m}(t-\Delta)$ с кадра на кадр. Данные наборы точек нельзя назвать траекториями, так как они вычислены без учета смещения изображений снимаемой сцены на кадрах относительно друг друга, вызванного движением камеры. Для построения траектории движения точек (1) на текущем кадре \mathbf{I}_t нужно найти проекции точек $\mathbf{d}_{j,m}(\ell)$, $t-\Delta \leq \ell \leq t$, на текущий кадр с помощью проективных преобразований $P_{t-\Delta,t-\Delta+1}, P_{t-\Delta+1,t-\Delta+2}, \dots, P_{t-1,t}$. Для этого используется суперпозиция проективных преобразований

$$P_{t-\ell,t} = P_{t-1,t} \cdot \dots \cdot P_{t-i,t-i+1} \cdot \dots \cdot P_{t-\ell,t-\ell+1}$$

(очевидно, что $P_{t,t}$ равно единичному оператору E). Траектории

$$T_{j,m}(t-\Delta, t) = \{\mathbf{q}_{j,m}(t-\Delta), \mathbf{q}_{j,m}(t-\Delta+1), \dots, \mathbf{q}_{j,m}(t)\}, 0 \leq m < \mathbb{k},$$

движения начальных точек $\mathbf{d}_{j,m}(t-\Delta)$ на текущем кадре имеют вид

$$T_{j,m}(t-\Delta, t) = \{P_{t-\Delta,t}\mathbf{d}_{j,m}(t-\Delta), P_{t-\Delta+1,t}\mathbf{d}_{j,m}(t-\Delta+1), \dots, P_{t,t}\mathbf{d}_{j,m}(t)\}, 0 \leq m < \mathbb{k},$$

т. е. точки $\mathbf{q}_{j,m}(\ell)$, $t-\Delta \leq \ell \leq t$, траектории $T_{j,m}(t-\Delta, t)$ вычисляются по формуле $\mathbf{q}_{j,m}(\ell) = P_{\ell,t}\mathbf{d}_{j,m}(\ell)$. Совокупность траекторий, первоначально порожденных кластером $C_j(t-\Delta)$ обозначим через $\mathbf{T}_j(t-\Delta, t)$.

Далее будем называть кластер $C_j(t)$ на маске $\mathbf{D}(t)$ впервые появившимся, если ни одна из существующих в данный момент траекторий не попадает в прямоугольник, ограничивающий этот кластер. Это не самое точное определение новизны кластера, однако его проверка занимает допустимое время.

До настоящего момента упоминались совокупности траекторий $\mathbf{T}_j(t-\Delta, t)$, порождаемые на впервые появившихся кластерах. Простые реализации оптического потока (например, Лукаса–Канаде), используемые для обеспечения режима реального времени работы алгоритма, в том числе на малых вычислителях, обладают ощутимой погрешностью, с которой приходится бороться. Для этого после перевода точек траекторий $T_{j,m}(t-\Delta, t-1)$, $0 \leq m < \mathbb{k}$, из набора $\mathbf{T}_j(t-\Delta, t)$, порожденных отдельным кластером $C_j(t-\Delta)$ на текущий кадр \mathbf{I}_t и их дополнения точками $\mathbf{d}_{j,m}(t)$ до $T_{j,m}(t-\Delta, t)$, вычисляется центр масс этих точек

$$\mathbf{m}_j(t) = \frac{1}{\mathbb{k}} \sum_{m=0}^{\mathbb{k}-1} \mathbf{d}_{j,m}(t),$$

а затем проверяется условие попадания последних точек траекторий $\mathbf{d}_{j,m}(t)$ в круг наперед заданного радиуса R_0 , т. е. условие

$$\|\mathbf{m}_j(t) - \mathbf{d}_{j,m}(t)\| \leq R_0, 0 \leq m < \mathbb{k}. \quad (2)$$

Траектории $T_{j,m}(t-\Delta, t)$, для которых условие (2) не выполняется, удаляются из $\mathbf{T}_j(t-\Delta, t)$.

Удаляются также негладкие траектории, а также траектории с точками, средняя скорость которых слишком мала (такие траектории с большой вероятностью соответствуют неподвижным или останавливающимся объектам). Для удаления траекторий использован алгоритм, подробно описанный в [3].

Если число оставшихся после удаления траекторий в наборе $\mathbf{T}_j(t - \Delta, t)$ не превосходит двух, этот набор удаляется.

Если число оставшихся после удаления траекторий в наборе $\mathbf{T}_j(t - \Delta, t)$ больше двух, и оставшиеся траектории попадают в какой-либо кластер движения $C_i(t)$, вместо удаленных траекторий порождается такое же количество новых траекторий $T_{j,m}(t, t)$, состоящих в момент времени t из одной точки $\mathbf{d}_{j,m}(t)$. Начальные точки $\mathbf{d}_{j,m}(t)$ новых траекторий выбираются из кластера $C_i(t)$ на маске $\mathbf{D}(t)$, в который попали оставшиеся траектории из набора $\mathbf{T}_j(t - \Delta, t)$. Таким образом, после дополнения в наборе $\mathbf{T}_j(t - \Delta, t)$ вновь оказывается k траекторий $T_{j,m}(t_m, t)$, но возможно, порожденных на разных кадрах.

Набор траекторий $\mathbf{T}_j(t - \Delta, t)$ начинает рассматриваться как соответствующий движущемуся объекту, если в нем найдется хотя бы одна достаточно длинная траектория $T_{j,m}(t_m, t)$, или более конкретно, при первом выполнении для некоторого натурального числа τ условия

$$\max_{0 \leq m < k} (\dim(T_{j,m}(t_m, t))) \geq \tau. \quad (3)$$

Условие (3) используется для уменьшения вероятности ложного обнаружения движущихся объектов.

В результате применения алгоритма находятся прямоугольники Rec_j , ограничивающие кластеры маски $\mathbf{D}(t)$, в которые попали траектории хотя бы одного набора $\mathbf{T}_j(t - \Delta, t)$, удовлетворяющего условию (3). Находятся также центры масс $\mathbf{m}_j(t)$ конечных точек $\mathbf{d}_{j,m}(t)$ траекторий. С высокой вероятностью значительная часть прямоугольника Rec_j лежит внутри прямоугольной рамки, ограничивающей силуэт движущегося объекта, а центр масс $\mathbf{m}_j(t)$ траекторий $\mathbf{T}_j(t - \Delta, t)$ (удовлетворяющих условию (3)) принадлежит силуэту движущегося объекта или находится на очень близком расстоянии от него. Движущийся объект отмечается центром $\mathbf{m}_j(t)$ набора траекторий $\mathbf{T}_j(t - \Delta, t)$ (удовлетворяющих условию (3)).

Поскольку алгоритм CAMOD предназначен для выполнения на малых вычислителях, не имеющих GPU и NPU, он решает только задачу обнаружения движущихся объектов. Его можно применять в режиме, близком к режиму реального времени для сопровождения лишь нескольких движущихся объектов. Для надежного сопровождения большого числа обнаруженных движущихся объектов в настоящее время используются более вычислительно трудоемкие алгоритмы, основанные в том числе на анализе внешних признаков объектов с помощью СНС, выполняемые на GPU или NPU.

В случае необходимости и возможности решения задачи сопровождения всех движущихся объектов на вычислителе с GPU можно добавить к CAMOD один из лучших известных в настоящее время трекеров движущихся объектов Deep SORT [5].

Результаты и их обсуждение. Для исследования характеристик построенного алгоритма CAMOD было проведено его тестирование на видеопоследовательностях разных размеров, начиная от 320×240 до 1920×1080 (Full HD), снятых различными камерами.

Ниже приведены результаты тестирования алгоритма на открытом размеченном наборе данных UAVDT, содержащем 20 различных видео, состоящих суммарно из 16592 кадров размера 1024×540 пикселей. Размеченный движущийся на тестовом видео объект считался обнаруженным, если центр $\mathbf{m}_j(t)$ какого-либо набора траекторий $T_{j,m}(t_m, t)$, соответствующего этому объекту, находился от него на разрешенном расстоянии, не превышающем наперед заданное r .

При тестировании использовались следующие значения расстояний $r = 0, 1, \frac{1}{2}R_0, R_0$ пикселей от центров $\mathbf{m}_j(t)$ наборов траекторий до истинных (ground truth) прямоугольников, ограничивающих движущиеся объекты. Такой способ тестирования объясняется тем, что маска движения никогда не попадает полностью в силуэт движущегося объекта, и следовательно, точки траекторий $\mathbf{d}_{j,m}(t)$ время от времени оказываются рядом с объектом. При $r = 0$ движущийся объект считается обнаруженным, если центр $\mathbf{m}_j(t)$ набора траекторий попадает в истинный прямоугольник, ограничивающий этот объект.

Ниже приведены результаты тестирования для разных значений r при $R_0 = 10$ пикселей (таблица). При тестировании использованы стандартные характеристики: *точность* (Prec) –

отношение числа верно обнаруженных объектов к числу всех обнаруженных объектов, *полнота* (Rec) – отношение числа верно обнаруженных объектов к числу всех размеченных в датасете объектов и

$$F_1 = \frac{2 \text{ Prec Rec}}{\text{Prec} + \text{Rec}},$$

используемые в распознавании образов.

Результаты тестирования CAMOD

CAMOD test results

<i>r</i> (пикс)	Precision (%)	Recall (%)	F_1 (%)
0	62,22	55,15	58,47
1	62,63	55,65	58,94
5	63,68	57,44	60,40
10	64,39	60,35	62,31

Для сравнения разных алгоритмов нужно анализировать результаты их работы на одних и тех же размеченных наборах данных, которые не всегда можно получить в открытом доступе, поэтому эффективность CAMOD сравнивалась на использованном датасете UAVDT с эффективностью алгоритма, предложенного Р. С. Жук в [3]. Этот алгоритм тестировался ранее и сравнивался на датасете PESMOD с другими известными алгоритмами. Он значительно превзошел другие известные алгоритмы, не использующие нейронные сети (результаты тестирования приведены в [3]).

Результаты, полученные алгоритмом [3] на наборе данных UAVDT: Precision_[3] = 64,96 %, Recall_[3] = 42,35 % и $F_{1[3]}$ = 51,27 %. Результаты, полученные CAMOD при самой строгой проверке обнаружения движущегося объекта (при $r = 0$): Precision_{CAMOD} = 62,22 %, Recall_{CAMOD} = 55,15 % и F_{1CAMOD} = 58,47 %. Значение комплексного критерия F_1 алгоритма CAMOD (при строгой проверке обнаружения) на 7,2 % больше значения F_1 упомянутого алгоритма [1].

Быстродействие неоптимизированной версии CAMOD при выполнении на PC Intel Core i7-6700 на наборе данных UAVDT равно 49,2 кадрам в секунду.

Заключение. Тестирование построенного алгоритма CAMOD показало возможность его применения для обнаружения движущихся объектов с помощью вычислителей без мощных средств параллельных вычислений, таких как GPU и NPU.

Недостатком алгоритма является его относительно низкая точность (precision) при обнаружении движения на глубоких сценах, например, когда видео получено камерой низколетящего над городом БЛА, из-за проявляющегося в этом случае параллакса.

Список использованных источников

1. Chapel, M.-N. Moving Objects Detection with a Moving Camera: A Comprehensive Review / M.-N. Chapel, T. Bouwmans // *Computer Science Review*. – 2020. – Vol. 38. – Art. 100310. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100310>
2. Motion Detection [Electronic resource]. – Mode of access: <https://paperswithcode.com/task/motion-detection>. – Date of access: 25.05.2022.
3. Жук, Р. С. Автоматическое обнаружение и отслеживание движущихся объектов, наблюдаемых видеокамерой беспилотного летательного аппарата / Р. С. Жук // *Информатика*. – 2021. – Т. 18, № 2. – С. 83–97. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-2-83-97>
4. Gonzales, R. C. Digital Image Processing / R. C. Gonzales, R. E. Woods. – 4 ed. – Pearson/Prentice-Hall, 2018. – 1192 p.
5. Wojke, N. Simple online and realtime tracking with a deep association metric / N. Wojke, A. Bewley, D. Paulus // *ICIP'17: Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Image Processing*. – 2017. – P. 3645–3650. <https://doi.org/10.1109/icip.2017.8296962>

References

1. Chapel M.-N., Bouwmans T. Moving Objects Detection with a Moving Camera: A Comprehensive Review. *Computer Science Review*, 2020, vol. 38, art. 100310. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100310>
2. *Motion Detection*. Available at: <https://paperswithcode.com/task/motion-detection> (accessed 25 May 2022).
3. Zhuk R. S. Automatic detection and tracking the moving objects observed by an unmanned aerial vehicles video camera. *Informatics*, 2021, vol. 18, no. 2. pp. 83–97 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-2-83-97>

4. Gonzales R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing. Forth Edition*. Pearson/Prentice-Hall. 2018. 1192 p.
5. Wojke N., Bewley A., Paulus D. Simple online and realtime tracking with a deep association metric. *ICIP'17: Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Image Processing*. 2017, pp. 3645–3650. <https://doi.org/10.1109/icip.2017.8296962>

Информация об авторе

Залесский Борис Андреевич – д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией. Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zalesky@newman.bas-net.by.

Information about the author

Zalesky Boris A. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory. United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surганov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zalesky@newman.bas-net.by.

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

ХИМИЯ
CHEMISTRY

УДК 543.54; 544.72
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-27-37>

Поступило в редакцию 03.01.2023
Received 03.01.2023

Член-корреспондент А. И. Иванец, Д. В. Печёнка, В. Г. Прозорович, Т. Ф. Кузнецова

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

**СИНТЕЗ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АДсорбЕНТОВ
НА ОСНОВЕ $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$**

Аннотация. С использованием твердофазного, золь-гель и гидротермального методов синтезированы адсорбенты на основе двойных оксидов лития-марганца шпинельной структуры $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$. Установлено влияние способа синтеза и температуры последующей термообработки на кристаллическую структуру, фазовый состав, текстурные свойства и морфологию полученных адсорбентов. Выявлено, что образцы, полученные твердофазным и золь-гель методами и прокаленные при 600 °С, являются однофазными ($\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$), а примесная фаза Mn_2O_3 образуется только при гидротермальном синтезе. С ростом температуры прокаливания от 400 до 800 °С наблюдается увеличение среднего размера кристаллитов, снижение удельной поверхности и общего объема пор. Полученные золь-гель и гидротермальными методами образцы после прокаливания при 600 °С показали наиболее высокую эффективность сорбции ионов Li^+ .

Ключевые слова: $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$, адсорбенты ионов Li^+ , фазовый состав, текстурные характеристики, морфология

Для цитирования. Синтез и физико-химические свойства адсорбентов на основе $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ / А. И. Иванец [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 1. – С. 27–37. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-27-37>

**Corresponding Member Andrei I. Ivanets, Darya V. Pecheoncka,
Vladimir G. Prozorovich, Tatyana F. Kouznetsova**

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

SYNTHESIS AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF ADSORBENTS BASED ON $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$

Abstract. Adsorbents based on binary lithium-manganese oxides with the spinel structure of $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ were synthesized by using solid-phase, sol-gel, and hydrothermal methods. The effect of the synthesis methods and calcination temperature on the crystal structure, phase composition, textural characteristics, and morphology of prepared adsorbents was established. It was found that the samples obtained by solid-phase and sol-gel methods and calcined at 600 °C were single-phase ($\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$) while the Mn_2O_3 trace phase was also obtained only in hydrothermal synthesis. The increase in the average crystallite size and the decrease in the specific surface and the total volume of pores were observed during temperature rise in the range from 400 to 800 °C. The samples prepared by sol-gel and hydrothermal methods after at 600 °C calcination had the highest adsorption efficiency of Li^+ ions.

Keywords: $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$, adsorbents of Li^+ ions, phase composition, textural characteristics, morphology

For citation. Ivanets A. I., Pecheoncka D. V., Prozorovich V. G., Kouznetsova T. F. Synthesis and physicochemical properties of adsorbents based on $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 1, pp. 27–37 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-27-37>

Введение. Литий относится к критически важным химическим элементам с ограниченными природными запасами на Земле (разведано ≈ 45 Мт) [1]. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка новых технологий освоения гидротермальных рассолов в качестве литийсодержащего сырья, а также вторичного извлечения лития из отработанных литий-ионных

накопителей энергии [2]. Применение неорганических литий-ионных сит для извлечения ионов лития из водных сред считается одним из наиболее перспективных методов. К преимуществам адсорбции на литий-ионных ситах относятся высокая эффективность извлечения ионов лития из низкоконцентрированных растворов, селективность в присутствии конкурирующих ионов и возможность многократного применения адсорбентов [3].

Двойные оксиды Li–Mn со структурой шпинели (LiMn_2O_4 , $\text{Li}_{1,6}\text{Mn}_{1,6}\text{O}_4$ и $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$) характеризуются высокой адсорбционной емкостью и селективностью к ионам Li^+ на фоне конкурирующих ионов щелочных и щелочноземельных металлов. Теоретическая адсорбционная емкость различных адсорбентов зависит от строения и соотношения атомов Li/Mn. Так, с увеличением атомного соотношения Li/Mn в прекурсор теоретическое значение адсорбционной емкости ионов Li^+ увеличивается и может достигать 10,5 ммоль/г (72,9 мг/г) для оксида $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ [4].

Адсорбенты на основе Li–Mn шпинелей получают различными методами из соответствующих прекурсоров металлов (оксиды, карбонаты, ацетаты и др.). Твердофазный, золь-гель и гидротермальный методы синтеза широко описаны в литературе в связи с их высокой эффективностью и простотой осуществления. При этом условия синтеза (способ получения, температура, природа и концентрация прекурсоров, температура обработки и др.) оказывают значительное влияние на фазовый состав получаемых оксидов, параметры кристаллической структуры, текстурные свойства и морфологию частиц [5–7]. Вместе с тем исследования по определению оптимальных условий синтеза адсорбентов на основе оксида $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ носят фрагментарный характер.

Цель работы – установление закономерностей получения адсорбентов на основе $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ и выявление оптимальных условий синтеза образцов с наиболее высокой адсорбционной емкостью ионов Li^+ .

Экспериментальная часть. Ацетат лития CH_3COOLi , ацетат марганца $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Mn}$, карбонат лития Li_2CO_3 , гидроксид лития LiOH , лимонная кислота $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ квалификации «х. ч.» («5 океанов», Беларусь) использовали для получения образцов адсорбентов на основе $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$.

Твердофазный метод. Прекурсоры Li_2CO_3 и $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Mn}$ смешивали в молярном соотношении $n(\text{Li}) : n(\text{Mn}) = 1,33 : 1,67$ и прессовали при давлении 12 Н/см² в цилиндрические блоки (высота – 10 мм, диаметр – 19 мм). Термообработку проводили на воздухе в лабораторной печи B180 (Nabertherm, Германия) со скоростью нагрева 5 °С/мин и выдержкой в течение 5 ч при 600 °С. Полученные образцы многократно промывали на фильтре дистиллированной водой и сушили в течение 5 ч в воздушном стерилизаторе ГП-40-3 (Витязь, Беларусь) при 100 °С.

Гидротермальный метод. В аликвоту 150 мл раствора 0,1М LiOH вносили заданную навеску оксида марганца ($\delta\text{-MnO}_2$), полученного по методике [8]. Полученную смесь переносили в автоклав из нержавеющей стали с тефлоновым вкладышем объемом 200 мл и выдерживали в течение 10 ч при 160 °С. Образовавшийся осадок многократно промывали дистиллированной водой до нейтрального значения pH и сушили в течение 5 ч в воздушном стерилизаторе при 50 °С. Далее полученные образцы прокаливали в течение 5 ч при 600 °С.

Золь-гель метод. Прекурсоры CH_3COOLi и $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Mn}$ смешивали в молярном соотношении $n(\text{Li}) : n(\text{Mn}) = 1,33 : 1,67$ для приготовления водного раствора, в который вносили $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ в молярном соотношении 2 : 3 относительно $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$. Полученную смесь упаривали при постоянном перемешивании на магнитной мешалке Yellow Mag HS 7 (IKA, Германия) в течение 1 ч при 90 °С до образования вязкого геля, который высушивали при 140 °С в течение 5 ч в воздушном стерилизаторе. Полученный порошок прокаливали в течение 5 ч в воздушной среде при 400, 600 и 800 °С. Образцы многократно промывали на фильтре дистиллированной водой и сушили в течение 5 ч в воздушном стерилизаторе при 100 °С.

Изучение термохимических превращений в процессе синтеза образцов $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ осуществляли на дериватографе STA 409 PC/PG (Netzsch, Германия) путем дифференциально-термического и термогравиметрического анализа (ДТА-ТГ) в интервале температур 20–1000 °С при скорости нагрева 10 °С/мин. Анализ проводили в потоке аргона (Ar), используя навеску массой 50 мг.

Рентгенофазовый анализ (РФА) выполняли на дифрактометре ДРОН-3 (Буревестник, Россия) с CuK_α -излучением в интервале $2\Theta = 10\text{--}75^\circ$. Идентификацию фаз по набору межплоскостных

расстояний (d) с проставлением индексов Миллера (hkl) для полученных образцов осуществляли с использованием специализированного программного обеспечения Match! версия 3.13 (Crystal Impact GbR, Германия) базы данных COD_20211214 (ICDD PDF-2).

Для расчета параметра элементарной ячейки (a , Å) определяли межплоскостное расстояние (d , Å) наиболее интенсивного характеристического пика по уравнениям:

$$a = \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \times d,$$

где d – межплоскостное расстояние, (Å); hkl – индексы Миллера;

$$d = (n \times \lambda) / (2 \times \sin \Theta),$$

где Θ – угол дифракции (рад); λ – длина волны рентгеновского излучения (нм); n – порядок дифракционного максимума.

Оценку размеров кристаллитов (D , нм) проводили по формуле Шеррера

$$D = (K \times \lambda) / (\beta \times \cos \Theta),$$

где K – постоянная Шеррера; λ – длина волны рентгеновского излучения (нм); β – ширина рефлекса на полувысоте (рад); Θ – угол дифракции (рад).

ИК-спектры полученных образцов записывали на ИК-спектрометре с фурье-преобразователем Tensor-27 (Bruker Optik GmbH, Германия) в диапазоне частот 4000–400 см⁻¹. Предварительно образцы измельчали в агатовой ступке и прессовали в таблетки с KBr – 3 мг/800 мг. Скорость сканирования составляла 10–20 см⁻¹/мин, спектральная ширина щели во всем диапазоне не превышала 3 см⁻¹.

Адсорбционные и текстурные свойства адсорбентов на основе Li_{1,33}Mn_{1,67}O₄ изучали методом низкотемпературной (77 К) физической адсорбции-десорбции азота на анализаторе площади поверхности и пористости ASAP 2020 MP (Micromeritics, США). Для исследования использовали образцы, синтезированные твердофазным, золь-гель и гидротермальным методами и прокаленные при 600 °С. Удельную поверхность образцов определяли методом БЭТ ($A_{\text{БЭТ}}$). Общий объем пор ($V_{\text{sp.des}}$) и средний размер пор ($D_{\text{sp.des}}$) рассчитывали методом одной точки по десорбционной ветви изотермы. Перед анализом образцы вакуумировали в течение 1 ч при температуре 150 °С и остаточном давлении $133,3 \cdot 10^{-3}$ Па.

Морфологию поверхности и химический состав образцов исследовали на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610 LV при ускоряющем напряжении 20 кВ с приставкой рентгеновского энергодисперсионного анализа JED-2201 (JEOL, Япония).

Для проведения сорбционного эксперимента по извлечению лития из раствора были получены Н-формы образцов Li_{1,33}Mn_{1,67}O₄. Перевод оксидных образцов (1,0 г) в Н-форму осуществляли в 0,1 М растворе HCl (80,6 мл) при температуре 20 °С и времени контакта 24 ч. Полученные Н-формы адсорбентов промывали дистиллированной водой до нейтрального pH. Для сорбционного эксперимента использовали навеску адсорбента массой 40 мг и аликвоту 10,0 мл раствора LiCl с концентрацией 1000 мг/л. Время контакта составляло 24 ч, температура раствора – 50 °С. Концентрацию ионов Li⁺ определяли с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой IRIS Intrepid II XDL (Thermo Scientific, США).

Результаты и их обсуждение. При получении образца Li_{1,33}Mn_{1,67}O₄ твердофазным методом обнаруживается размытый эндотермический эффект в интервале 100–175 °С, сопровождающийся существенной потерей массы 22,7 %, что обусловлено удалением физической связанной воды. Эндо-эффект с максимумом при 235 °С связан с разложением прекурсора (CH₃COO)₂Mn (потеря массы 7,2 %). Далее при 350–400 °С протекает эндотермический процесс разложения прекурсора Li₂CO₃ и начинается формирование кристаллической структуры оксида Li_{1,33}Mn_{1,67}O₄. Термические эффекты в диапазоне 700–720 °С обусловлены потерей молекулярного кислорода и образованием оксида Mn₂O₃ (рис. 1, а).

При золь-гель синтезе на ДТА кривой идентифицируется эндотермический пик с максимумом при 72 °С, который сопровождается потерей массы 4,7 %, обусловленной удалением физической

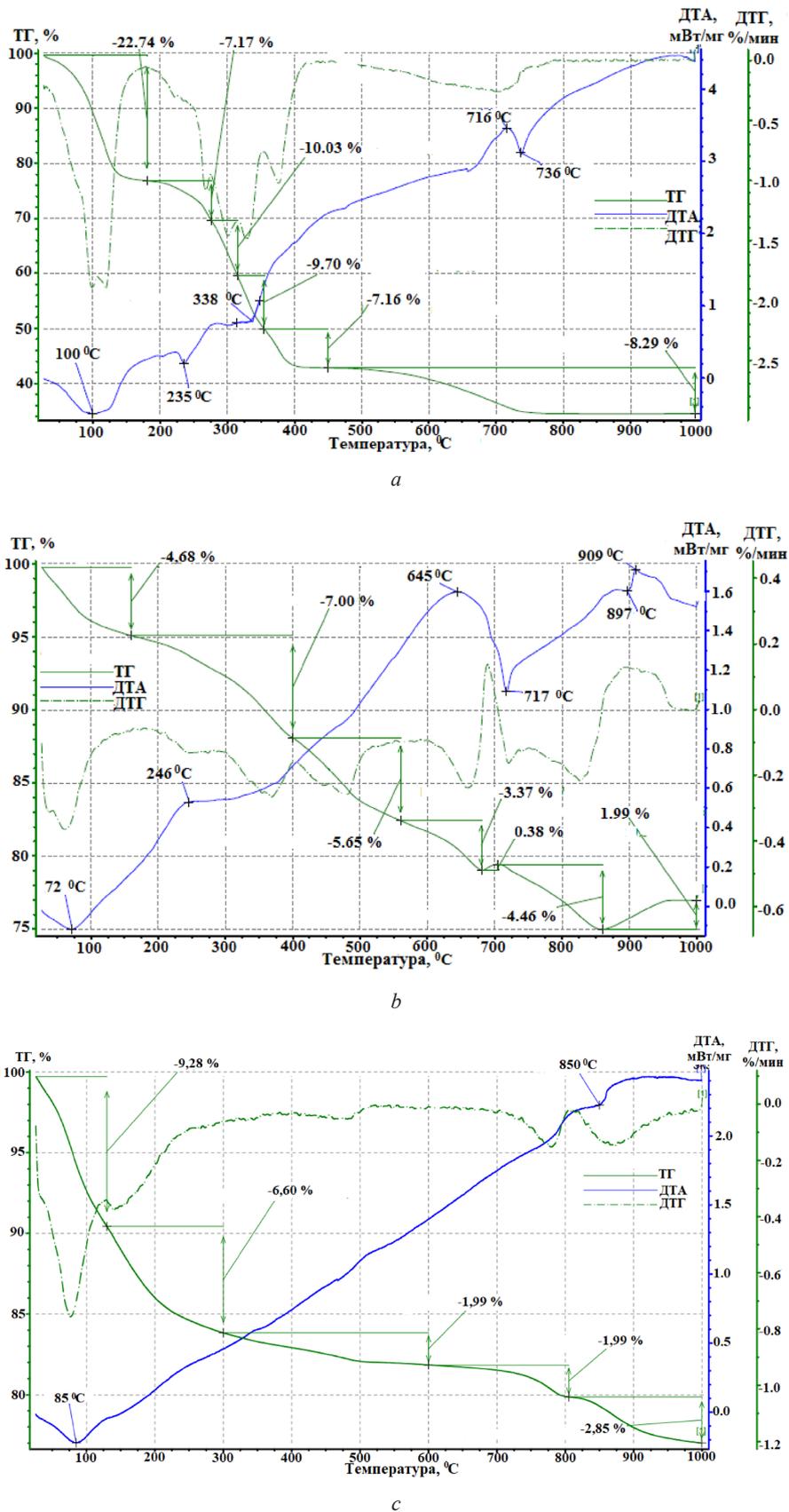


Рис. 1. ДТА-ТГ кривые получения образцов $\text{Li}_{1.33}\text{Mn}_{1.67}\text{O}_4$ твердофазным (а), золь-гель (b) и гидротермальным (c) методами синтеза

Fig. 1. DTA-TG curves of $\text{Li}_{1.33}\text{Mn}_{1.67}\text{O}_4$ samples solid-phase (a), sol-gel (b) and hydrothermal (c) methods

связанной воды. Разложение ацетатных прекурсоров (CH_3COOLi и $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Mn}$), происходящее в диапазоне температур 200–550 °С, объясняет появление сильно размытого многоступенчатого эндотермического эффекта с потерей массы 12,7 %. Самовоспламенение цитрат-ацетатной смеси и полное выгорание сопровождаются выраженным экзотермическим эффектом при 645 °С. Эндотермический пик при 717 °С с потерей массы 4,46 %, как и при твердофазном синтезе, обусловлен началом разложения $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$. Дальнейшее прокаливание сопровождается экзотермическим эффектом при 909 °С и увеличением массы на 0,38 %, что объясняется поглощением кислорода и образованием оксидов Mn (III, IV) (рис. 1, *b*).

Результаты ДТА-ТГ анализа при гидротермальном синтезе существенно отличаются от данных, полученных при использовании твердофазного и золь-гель методов. Так, на ТГ-кривой идентифицируются четыре участка с суммарной потерей массы около 25 % в интервалах 85–300, 300–600, 600–800 и 800–1000 °С, которые могут быть отнесены к удалению физически и химически связанной воды, фазовым превращениям прекурсора $\delta\text{-MnO}_2$, формированию $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$, а также последующему образованию оксида Mn_2O_3 (рис. 1, *c*).

На рис. 2 представлены рентгенограммы образцов, полученных при 600 °С с использованием различных методов синтеза. Так, однофазный оксид $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ образуется при использовании твердофазного и золь-гель синтеза (рис. 2, *a*), о чем свидетельствуют соответствующие узкие и интенсивные дифракционные пики при 2Θ 18,9 (111), 36,7 (311), 44,5 (400), 58,8 (511) и 64,7 (404). На рентгенограмме образца, полученного гидротермальным методом, идентифицируется примесная фаза Mn_2O_3 , что обусловлено неполным взаимодействием LiOH с прекурсором $\delta\text{-MnO}_2$.

Рассчитанное значение параметра a кристаллической решетки образца $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$, полученного твердофазным методом, составляет 8,197 Å, что практически идентично справочному

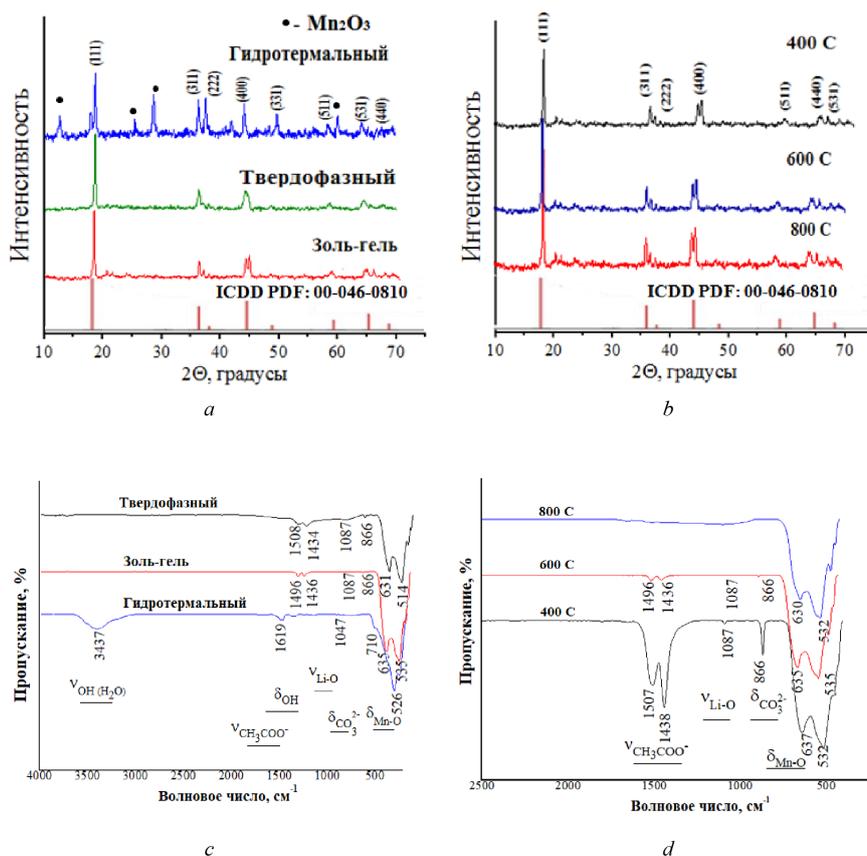


Рис. 2. Рентгенограммы и ИК-спектры образцов $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$, полученных в различных условиях: твердофазным, золь-гель и гидротермальным методами, после термообработки при 600 °С (*a, c*), а также полученных золь-гель методом и прокаленных при 400, 600 и 800 °С (*b, d*)

Fig. 2. XRD patterns and FTIR spectra $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ samples was synthesized solid-phase, sol-gel and hydrothermal methods, after calcined at 600 °С (*a, c*), and also synthesized sol-gel method and calcined at 400, 600 и 800 °С (*b, d*)

значению (8,190 Å для $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ COD_96-402-9204). Для образцов, полученных золь-гель и гидротермальным методами, рассчитаны более низкие значения параметра a 8,120 и 8,167 Å соответственно. Также установлено, что для однофазных образцов, полученных золь-гель и твердофазным методами, характерны более низкие размеры кристаллитов (17,3 и 22,4 нм), в то время как для образца с примесью Mn_2O_3 (гидротермальным методом синтеза) средний размер кристаллитов составил 27,0 нм (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Параметры кристаллической структуры образцов $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$, полученных различными методами, после термообработки при 600 °С

Table 1. Parameters crystal structure of samples $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ was synthesized various methods, after calcined at 600 °С

Метод синтеза Synthesis method	D , нм	a^* , Å	V , Å ³
Твердофазный	22,4	8,197	550,7
Золь-гель	17,3	8,120	535,3
Гидротермальным	27,0	8,167	544,7

Примечание. * – параметр a для $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ составляет 8,190 Å (COD_96-402-9204).

Note. * – the parameter a of $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ is 8,190 Å (COD_96-402-9204).

Учитывая данные ДТА-ТГ анализа, представляло интерес изучение влияния температуры прокаливания на фазовый состав и параметры кристаллической структуры образцов. Согласно данным РФА образцы, полученные золь-гель методом, после термообработки в диапазоне 400–800 °С идентифицируются как однофазные, что подтверждается пиками, относящимися к структуре шпинели $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ (рис. 2, *b*). При этом с увеличением температуры термообработки от 400 до 800 °С наблюдается закономерный рост среднего размера кристаллитов от 12,1 до 19,9 нм, обусловленный процессом спекания. Значения параметра a для образцов, полученных при 400 и 600 °С составляют 8,157 и 8,120 Å, что несколько ниже справочного значения 8,190 Å. С увеличением температуры прокаливания до 800 °С наблюдается рост интенсивности дифракционных пиков, при этом рассчитанное значение параметра a (8,171 Å) приближается к справочному (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Параметры кристаллической структуры образцов $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$, полученных золь-гель методом, после прокаливания при различных температурах

Table 2. Parameters crystal structure of samples $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ was synthesized sol-gel method, after calcined at various temperatures

Температура прокаливания, °С Ignition temperature, °С	D , нм	a^* , Å	V , Å ³
400	12,1	8,157	542,7
600	17,3	8,120	535,3
800	19,9	8,171	545,6

Примечание. * – параметр a для $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ составляет 8,190 Å (COD_96-402-9204).

Note. * – the parameter a of $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ is 8,190 Å (COD_96-402-9204).

На рис. 2, *c*, *d* приведены ИК-спектры образцов $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$, полученных твердофазным, золь-гель и гидротермальным методами, после прокаливания при 600 °С. Для гидротермального метода синтеза в образце наблюдаются характерные полосы валентных колебаний ОН-групп адсорбированной воды в диапазоне 3500–3400 см⁻¹. Также идентифицируются широкие полосы в области 700–530 см⁻¹, характерные для деформационных колебаний связи Мп–О, и в области 1085 см⁻¹ полосы валентных колебаний связи Li–О (рис. 2, *c*). Для образцов, полученных твердофазным и золь-гель методами, обнаруживаются характерные полосы валентных колебаний иона CH_3COO^- в диапазоне 1430–1510 см⁻¹. Следует отметить, что с увеличением температуры термообработки от 400 до 600 °С существенно уменьшается интенсивность полос ионов CH_3COO^-

и CO_3^{2-} , что свидетельствует о взаимодействии прекурсоров и окончании процесса формирования оксида $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ при температурах выше $600\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2, *d*).

Изотермы низкотемпературной адсорбции-десорбции азота на рис. 3 и 4 имеют более или менее ярко выраженные узкие петли капиллярно-конденсационного гистерезиса и по этому признаку могли бы быть отнесены к изотермам типа IV(a), характерным для мезопористых тел, по классификации IUPAC [9]. Однако присутствующие на изотермах петли капиллярно-конденсационного гистерезиса по форме соответствуют типу H3, обусловленному нежесткими агрегатами пластинчатых частиц, образующих щелевидные или клиновидные поры, и не имеют плато при высоких значениях относительного давления p/p_0 . Согласно этим признакам, изотермы на рис. 3 и 4 не могут быть отнесены к типу IV. Скорее всего, они соответствуют псевдотипу II, поскольку вся адсорбционная ветвь петли H3 имеет ту же форму, что и изотерма типа II, характерная для макропористых и непористых тел. Хотя обратимыми являются только начальные участки изотерм на рис. 3 и 4, характер измеренных изотерм псевдотипа II связан либо с нежесткостью структуры пластинчатых агрегатов, либо с замедленной капиллярной конденсацией [9]. Поэтому очень узкие петли гистерезиса типа H3 на изотермах образцов, полученных различными методами, свидетельствуют либо о наличии щелевидных пор, образуемых нежесткими агрегатами пластинчатых частиц, либо о наличии макропор, не полностью заполненных конденсатом. Объем мезопор на таких изотермах четко не определяется, поэтому следует с осторожностью интерпретировать поглощение при высоком относительном давлении p/p_0 . При очень малых объемах адсорбционного пространства образцов, приведенных в табл. 3 и 4, и похожести адсорбционных

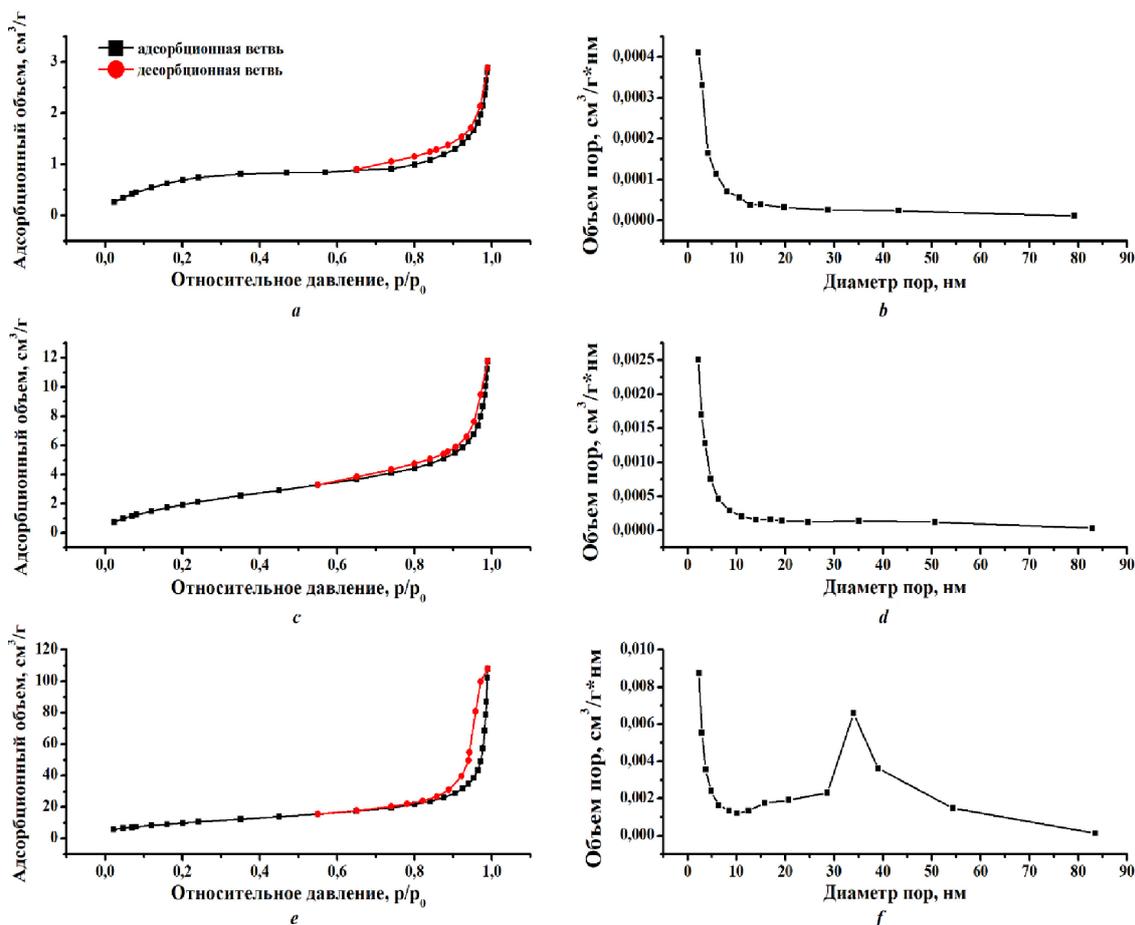


Рис. 3. Изотермы низкотемпературной адсорбции-десорбции азота (*a, c, e*) и ВЖН-распределение пор по размеру (*b, d, f*) образцов $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$, полученных твердофазным (*a, b*), золь-гель (*c, d*) и гидротермальным (*e, f*) методами, после прокалывания при температуре $600\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 3. Isotherms of N_2 adsorption-desorption (*a, c, e*) and BJH-distribution of the pore size (*b, d, f*) of samples $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ was synthesized solid-phase (*a, b*), sol-gel (*c, d*) and hydrothermal (*e, f*) methods after calcined at $600\text{ }^\circ\text{C}$

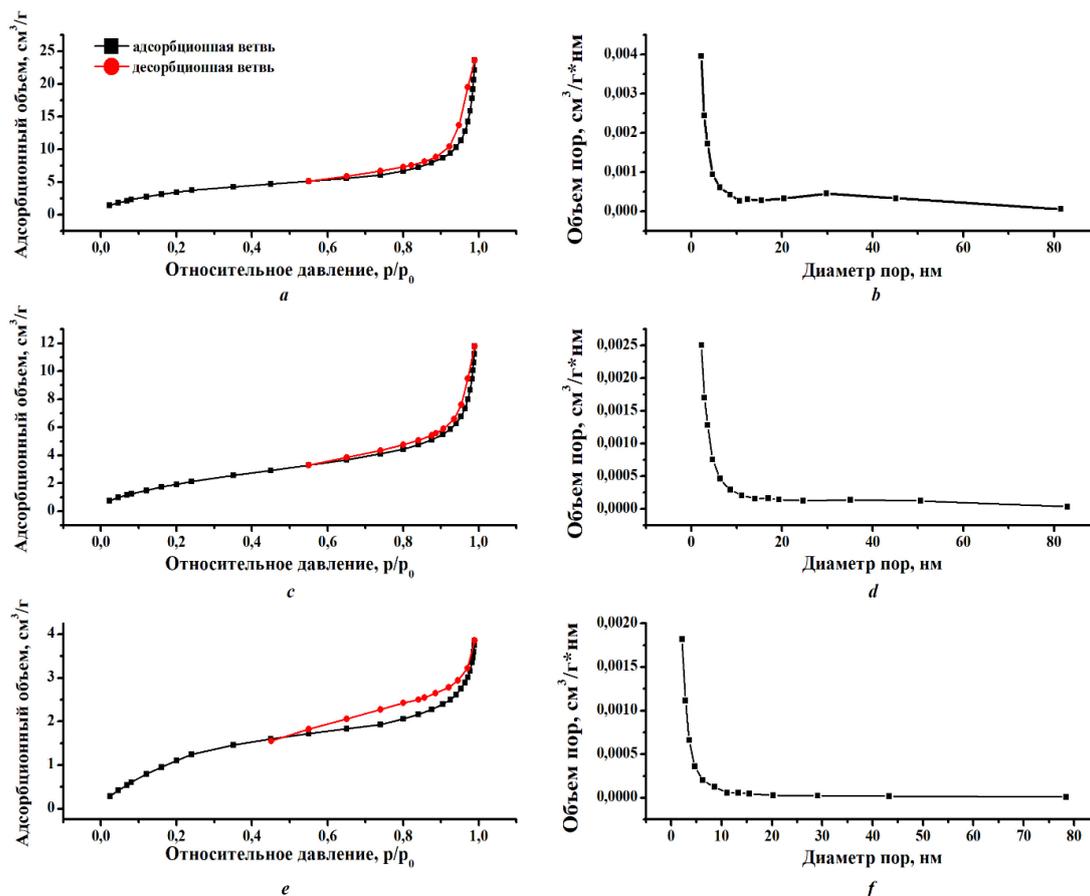


Рис. 4. Изотермы низкотемпературной адсорбции-десорбции азота (*a, c, e*) и ВЖН-распределение пор по размеру (*b, d, f*) образцов $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$, полученных золь-гель методом и прокаленных при 400 (*a, b*), 600 (*c, d*) и 800 °C (*e, f*)

Fig. 4. Isotherms of N_2 adsorption-desorption (*a, c, e*) and ВЖН-distribution of the pore size (*b, d, f*) of samples $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ was synthesized sol-gel method and calcined at 400 (*a, b*), 600 (*c, d*) and 800 °C (*e, f*)

ветвей изотерм на обратимые изотермы типа II напрашивается вывод о формировании в двойных оксидах Li–Mn крупномезопористой или макропористой структуры. Действительно, образцы, полученные твердофазным и золь-гель методами, не обнаруживают в мезопористой области $2 \leq D \leq 50$ нм полноценных максимумов распределения объема мезопор по размерам (рис. 3, *b, d*; 4, *d, b, f*). Лишь для образца, полученного гидротермальным методом и прокаленного при 600 °C (рис. 3, *f*), наблюдается очень размытый малоинтенсивный пик с максимумом при $D \approx 35$ нм.

Удельная поверхность полученных образцов слабо развита. Наибольшей удельной поверхностью, рассчитанной одно- (A_{sp}) и многоточечным методом БЭТ ($A_{\text{БЭТ}}$), обладает образец, полученный гидротермальным методом, значения удельной поверхности которого составляют 35 и 38 $\text{m}^2/\text{г}$ соответственно. При расчетах из адсорбционной и десорбционной ветвей изотермы наибольший из измеренных общий объем пор, по Гурвичу, также характерен для данного образца и составляет 0,12 и 0,15 $\text{cm}^3/\text{г}$. Согласно данным табл. 3, наименьшими средними размерами мезопор, по ВЖН, равными 11 и 8 нм соответственно, обладает образец, полученный золь-гель методом.

С увеличением температуры прокаливания от 400 до 800 °C у образцов $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$, полученных золь-гель методом, происходит снижение текстурных характеристик, обусловленное, по-видимому, спеканием. Из табл. 4 видно, что при более высоких температурах удельная поверхность падает, вещество подвергается усадке, и объем пор тоже неизбежно уменьшается. Так, удельная поверхность образцов, рассчитанная однотоочечным методом БЭТ из десорбционной ветви изотермы, снижается от 12 до 4 $\text{m}^2/\text{г}$, а общий объем и средний диаметр пор падают соответственно от 0,03 до 0,01 $\text{cm}^3/\text{г}$ и от 10 до 5 нм.

Т а б л и ц а 3. Текстуальные характеристики образцов $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$, полученных различными методами при $600\text{ }^\circ\text{C}$

Table 3. Textural characteristics of samples $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ was synthesized various method at $600\text{ }^\circ\text{C}$

Метод синтеза Synthesis method	Удельная поверхность, $\text{m}^2/\text{г}$ Specific surface, m^2/g		Объем пор, $\text{cm}^3/\text{г}$ Pore volume, cm^3/g		Средний размер мезопор, нм Average mesopore size, nm	
	A_{sp}	$A_{\text{ВЕТ}}$	V_{spads}	V_{spdes}	$D_{\text{ВНHads}}$	$D_{\text{ВНHdes}}$
Твердофазный	2	3	0,004	0,003	18	9
Золь-гель	7	8	0,02	0,02	11	8
Гидротермальный	35	38	0,12	0,15	21	16

Т а б л и ц а 4. Текстуальные свойства образцов $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$, полученных золь-гель методом при различных температурах

Table 4. Textural properties of samples $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ was synthesize by the sol-gel method at different temperatures

Температура прокаливания, $^\circ\text{C}$ Ignition temperature, $^\circ\text{C}$	Удельная поверхность, $\text{m}^2/\text{г}$ Specific surface, m^2/g		Объем пор, $\text{cm}^3/\text{г}$ Pore volume, cm^3/g		Средний диаметр пор, нм Average pore diameter, nm	
	A_{sp}	$A_{\text{ВЕТ}}$	V_{spads}	V_{spdes}	$D_{\text{ВНHads}}$	$D_{\text{ВНHdes}}$
400	12	14	0,03	0,03	16	10
600	7	8	0,02	0,02	11	8
800	4	6	0,01	0,01	8	5

Данные сканирующей электронной микроскопии (рис. 5, *a, b, c*) показывают, что метод синтеза оказывает существенное влияние на морфологию получаемой шпинели $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$. Так, при использовании твердофазного метода образуются крупные агломераты размером 1–4 мкм (рис. 5, *a*), состоящие из плоскопараллельных частиц. У образцов, полученных золь-гель методом

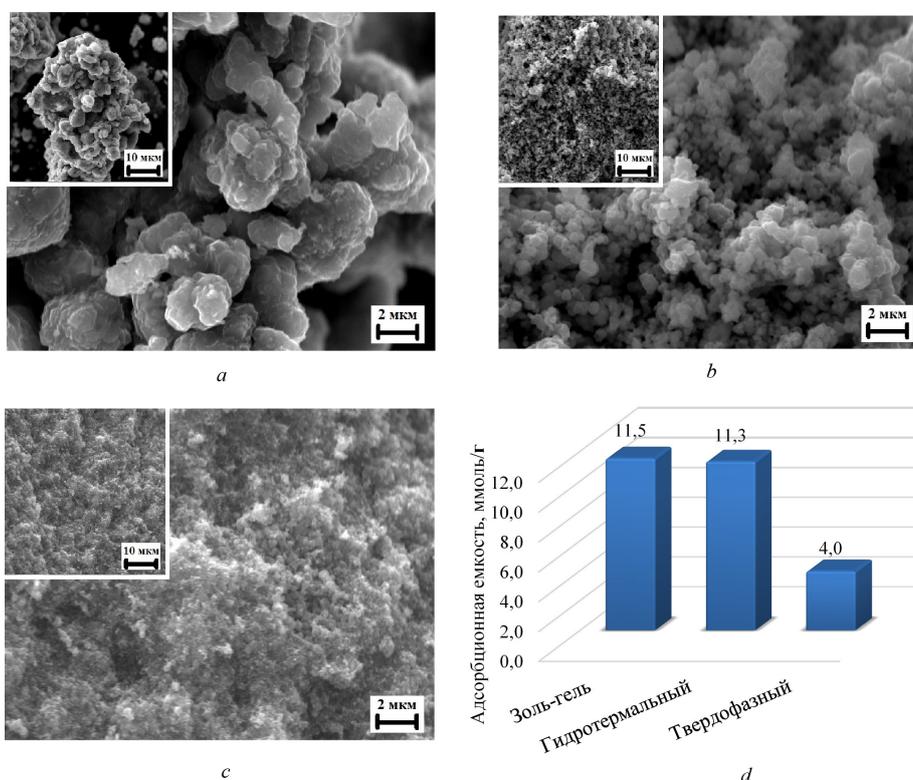


Рис. 5. СЭМ-изображение поверхности и адсорбционная емкость относительно ионов лития (*d*) образцов $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$, полученных твердофазным (*a*), золь-гель (*b*) и гидротермальным (*c*) методами, после прокаливании при $600\text{ }^\circ\text{C}$ (увеличение $\times 3000$ и $\times 10000$)

Fig. 5. SEM images and sorption capacity towards Li^+ ions of samples $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ was synthesized solid-phase (*a*), sol-gel (*b*) and hydrothermal (*c*) methods after calcined $600\text{ }^\circ\text{C}$ (magnitude $\times 3000$ and $\times 10000$)

(рис. 5, *b*), преобладают частицы округлой формы размером $\approx 0,5\text{--}2$ мкм. В случае использования гидротермального метода (рис. 5, *c*) образуются плотноупакованные высокодисперсные частицы неправильной формы с существенно меньшим размером частиц, чем у образцов, полученных твердофазным и золь-гель методами.

Образцы адсорбентов, полученные золь-гель и гидротермальными методами, показали наиболее высокую адсорбционную емкость относительно ионов лития, равную 11,5 и 11,3 ммоль/г соответственно. Данные значения близки к теоретической емкости двойных оксидов лития-марганца со структурой $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ [10]. Образец, полученный твердофазным методом, характеризуется наименьшей адсорбционной емкостью относительно ионов лития, составляющей 4,0 ммоль/г (рис. 5, *d*). Данные по адсорбции ионов Li^+ согласуются с результатами РФА и текстурными свойствами полученных адсорбентов.

Заключение. Изучены закономерности получения двойных оксидов Li–Mn со структурой шпинели $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$ в зависимости от метода синтеза и температуры последующей термообработки. Выявлено, что образцы, полученные твердофазным и золь-гель методами, после прокаливания при 600 °C содержат лишь одну фазу $\text{Li}_{1,33}\text{Mn}_{1,67}\text{O}_4$. Примесная фаза Mn_2O_3 образуется только при гидротермальном синтезе. Для образца, полученного золь-гель методом, увеличение температуры термообработки от 400 до 800 °C приводит к росту кристалличности при сохранении структуры шпинели, увеличению размера кристаллитов до 19,9 нм и снижению удельной поверхности, по БЭТ, до 6,0 м²/г, общего объема пор до 0,01 см³/г и среднего размера мезопор до 5,0 нм. Для морфологии полученных образцов характерно сочетание крупных агломератов пластинчатых частиц с размерами 1–4 мкм и более мелких агломератов неправильной формы с размерами 0,5–2 мкм. Наиболее высокой адсорбционной емкостью относительно ионов Li^+ обладают адсорбенты, полученные золь-гель (11,5 ммоль/г) и гидротермальным (11,3 ммоль/г) методами, после прокаливания при 600 °C.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ в рамках совместного белорусско-узбекского проекта (грант № X21Y3БГ-013). Авторы выражают благодарность научным сотрудникам лаборатории физико-химических исследований и агрохимических испытаний ИОНХ НАН Беларуси Л. В. Кульбицкой и О. А. Сычевой за помощь в проведении РФА, ИКС и ДТА-ТГ исследований.

Acknowledgements. This work was done in the framework of a joint Belarusian-Uzbek project (BRFFR grant no. X21Y3БГ-013). The authors are grateful to researchers of the Laboratory of Physical and Chemical Research and Agrochemical Testing IGIC NAS of Belarus Lyudmila Kulbitskaya and Olga Sychova for assistance in carrying out of XRD, FTIR and DTA-TG studies.

Список использованных источников

1. Grey, C. P. Prospects for lithium-ion batteries and beyond – a 2030 vision / C. P. Grey, D. S. Hall // *Nature Communications*. – 2020. – Vol. 11, N 1. – Art. 6279. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19991-4>
2. Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials / J. Baars [et al.] // *Nature Sustainability*. – 2020. – Vol. 4, N 1. – P. 71–79. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00607-0>
3. Recent advances in magnesium/lithium separation and lithium extraction technologies from salt lake brine / Y. Sun [et al.] // *Separation and Purification Technology*. – 2021. – Vol. 256. – Art. 117807. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117807>
4. Safari, S. Metal oxide sorbents for the sustainable recovery of lithium from unconventional resources / S. Safari, B. G. Lottermoser, D. S. Alessi // *Applied Materials Today*. – 2020. – Vol. 19. – Art. 100638. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100638>
5. Darul, J. Unusual compressional behavior of lithium-manganese oxides: A case study of $\text{Li}_4\text{Mn}_5\text{O}_{12}$ / J. Darul, W. Nowicki, P. Piszora // *Journal of Physical Chemistry*. – 2012. – Vol. 116, N 33. – P. 17872–17879. <https://doi.org/10.1021/jp302227p>
6. Sol-gel synthesis of normal spinel LiMn_2O_4 and its characteristics / J. H. Lei [et al.] // *J. Wuhan University of Technology*. – 2002. – Vol. 17, N 3. – P. 1–4. <https://doi.org/10.1007/bf02838527>
7. Jiang, C. From hydrated layered-spinel lithium manganite composite to high-performance spinel LiMn_2O_4 : A novel synthesis tuned by the concentration of LiOH / C. Jiang, Z. Tang, Z. Zhang // *Ceramics International*. – 2017. – Vol. 43, N 15. – P. 11773–11779. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.013>
8. Lei, J.-W. Highly crystalline lithium-manganese spinel prepared by a hydrothermal process with co-solvent / J.-W. Lei, J.-I. Kim, S. Hw. Min // *Journal of Power Sources*. – 2011. – Vol. 196, N 3. – P. 1488–1493. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.08.083>
9. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) / M. Thommes [et al.] // *Pure and Applied Chemistry*. – 2015. – Vol. 87, N 9–10. – P. 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
10. Lithium Recovery from Aqueous Resources and Batteries: A Brief Review / L. Li [et al.] // *Johnson Matthey Technology Rev.* – 2018. – Vol. 62, N 2. – P. 161–176. <https://doi.org/10.1595/205651317x696676>

References

1. Grey C. P., Hall D. S. Prospects for lithium-ion batteries and beyond – a 2030 vision. *Nature Communications*, 2020, vol. 11, no. 1, art. 6279. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19991-4>
2. Baars J., Domenech T., Bleischwitz R., Melin H. E., Heidrich O. Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials. *Nature Sustainability*, 2020, vol. 4, no. 1, pp. 71–79. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00607-0>
3. Sun Y., Wang Q., Wang Y., Yun R., Xiang X. Recent advances in magnesium/lithium separation and lithium extraction technologies from salt lake brine. *Separation and Purification Technology*, 2021, vol. 256, art. 117807. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117807>
4. Safari S., Lottermoser B. G., Alessi D. S. Metal oxide sorbents for the sustainable recovery of lithium from unconventional resources. *Applied Materials Today*, 2020, vol. 19, art. 100638. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100638>
5. Darul J., Nowicki W., Piszora P. Unusual compressional behavior of lithium-manganese oxides: A case study of $\text{Li}_4\text{Mn}_5\text{O}_{12}$. *Journal of Physical Chemistry*, 2012, vol. 116, no. 33, pp. 17872–17879. <https://doi.org/10.1021/jp302227p>
6. Lei J. H., Yu-bin S., Yong-xi C., Jin-rong W., Li-hui X. Sol-gel synthesis of normal spinel LiMn_2O_4 and its characteristics. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2002, vol. 17, no. 3, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1007/bf02838527>
7. Jiang C., Tang Z., Zhang Z. From hydrated layered-spinel lithium manganite composite to high-performance spinel LiMn_2O_4 : A novel synthesis tuned by the concentration of LiOH . *Ceramics International*, 2017, vol. 43, no. 15, pp. 11773–11779. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.013>
8. Lei J.-W., Kim J.-I., Min S. Hw. Highly crystalline lithium-manganese spinel prepared by a hydrothermal process with co-solvent. *Journal of Power Sources*, 2011, vol. 196, no. 3, pp. 1488–1493. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.08.083>
9. Thommes M., Kaneko K., Neimark A. V., Olivier J. P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K. S. W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 2015, vol. 87, no. 9–10, pp. 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
10. Li L., Deshmane V. G., Paranthaman M. P., Bhave R., Moyer B. A., Harrison S. Lithium Recovery from Aqueous Resources and Batteries: A Brief Review. *Johnson Matthey Technology Review*, 2018, vol. 62, no. 2, pp. 161–176. <https://doi.org/10.1595/205651317x696676>

Информация об авторах

Иванец Андрей Иванович – член-корреспондент, д-р хим. наук, профессор, вед. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: andreiivanets@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-3053-317x.

Печёнка Дарья Витальевна – аспирант, мл. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: d.pecheoncka2013@yandex.by.

Прозорович Владимир Геннадьевич – науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vladimirprozorovich@gmail.com.

Кузнецова Татьяна Федоровна – канд. хим. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tatyana.fk@gmail.com.

Information about the authors

Ivanets Andrei I. – Corresponding Member, D. Sc. (Chemistry), Professor, Leading Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andreiivanets@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-3053-317x.

Pecheoncka Darya V. – Postgraduate Student, Junior Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: d.pecheoncka2013@yandex.by.

Prozorovich Vladimir G. – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vladimirprozorovich@gmail.com.

Kouznetsova Tatyana F. – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tatyana.fk@gmail.com.

БИОЛОГИЯ
BIOLOGYУДК 577.352.4
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-38-40>Поступило в редакцию 19.05.2022
Received 19.05.2022**В. А. Урбан, В. Г. Вересов***Институт биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь***СТРУКТУРНОЕ ОБОСНОВАНИЕ АКТИВАЦИИ КИНАЗЫ ZAP-70
ПРИ ФОСФОРИЛИРОВАНИИ ТИРОЗИНОВ 315, 319 И 493***(Представлено членом-корреспондентом Е. И. Слобожаниной)*

Аннотация. Тирозиновая киназа ZAP-70 (Zeta-chain-Associated Protein kinase 70) является ключевым ферментом в регуляции адаптивного иммунного ответа. Связываясь своими SH2-доменами с цитоплазматическим доменом белка CD3 ζ , ассоциированного с Т-клеточным рецептором, Zap-70 осуществляет передачу активационного сигнала к Т-лимфоцитам, индуцированного взаимодействием главного комплекса гистосовместимости с Т-клеточным рецептором. Известно, что для киназной активации ZAP-70 также необходимым является фосфорилирование тирозинов 315, 319 и 493, однако механизмы активации неясны. В настоящем исследовании использованы средства молекулярной структурной биологии для установления этих механизмов.

Ключевые слова: Т-клеточный рецептор, CD3 ζ , ITAM, ZAP-70

Для цитирования. Урбан, В. А. Структурное обоснование активации киназы ZAP-70 при фосфорилировании тирозинов 315, 319 и 493 / В. А. Урбан, В. Г. Вересов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 1. – С. 38–40. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-38-40>

Viktor A. Urban, Valery G. Veresov*Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***STRUCTURAL BASIS OF ZAP-70 ACTIVATION UPON PHOSPHORYLATION
OF TYROSINES 315, 319 AND 493**

Abstract. ZAP-70 (Zeta-chain-Associated Protein kinase 70) is a key kinase in the regulation of the adaptive immune response. Zap-70 acts by binding its SH2-domains to the T-cell-associated CD3 ζ protein, thus transmitting a T-cell activation signal induced by the interaction of Major Histocompatibility Complex with T-cell Receptor. It has been established that for ZAP-70 kinase activation, the phosphorylation of Tyr315, Tyr319, and Tyr493 is required, however the mechanisms are unclear. In the present study, we use the tools of structural modeling to elucidate the ZAP-70 activation mechanisms.

Keywords: T-cell receptor, CD3 ζ , ITAM, ZAP-70

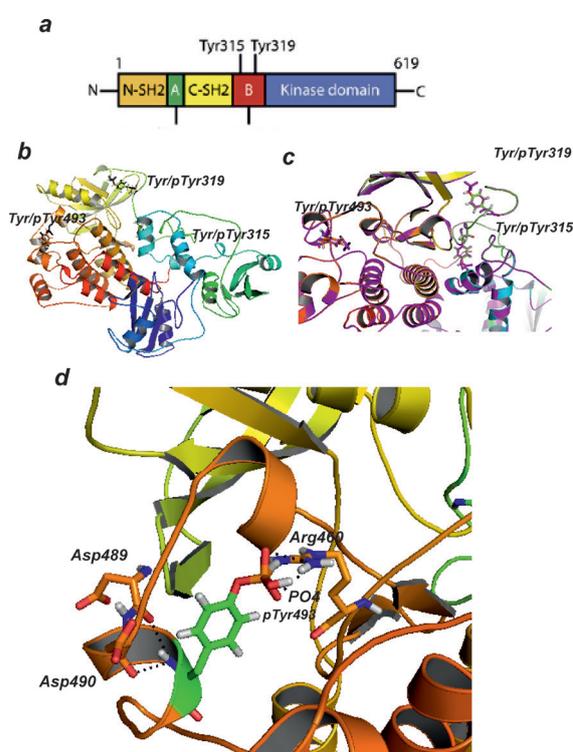
For citation. Urban V. A., Veresov V. G. Structural basis of ZAP-70 activation upon phosphorylation of tyrosines 315, 319 and 493. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 1, pp. 38–40 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-38-40>

Введение. После связывания главного комплекса гистосовместимости (ГКГ; Major Histocompatibility Complex; МНС), экспрессированного на антиген-презентирующих клетках, с Т-клеточным рецептором (ТКР) на Т-лимфоцитах происходит фосфорилирование киназой Lck тирозинов ITAM-мотивов во внутриклеточных участках димера белка CD3 ζ , ассоциированного с ТКР, что приводит к связыванию с ITAM-мотивами тирозиновой киназы ZAP-70 и рекрутированию последней к плазматической мембране, где осуществляется фосфорилирование тирозинов Tyr315

и Tyr319 линкера между SH2-доменом и киназным доменом киназы ZAP-70, а также фосфорилирование Tyr493 между двумя N- и C-долями киназного домена, что приводит к дальнейшему распространению сигнала и в конечном итоге к активации Т-клетки [1]. До последнего времени не существовало понимания на молекулярном уровне, каким образом активируется киназный домен ZAP-70 после фосфорилирования Tyr315, Tyr319 и Tyr493. К настоящему времени установлены атомистические структуры инактивированного ZAP-70, где Tyr315 и Tyr319 заменены на фенилаланины (ZAP-70_FF) [2] (PDBID: 2OZO), а также структура ZAP-70 с нефосфорилированными Tyr315 и Tyr319 (ZAP70_YY) [3]; (PDBID: 4K2R). Однако в обеих структурах отсутствуют остатки в активационной петле киназного домена, а также Tyr315 и Tyr319 присутствовали в нефосфорилированном состоянии, что не позволяет дать структурное обоснование изменений в киназной активности при фосфорилировании остатков 315, 319 и 493 [3]. В настоящем исследовании были получены полные структуры ZAP-70 с нефосфорилированными и фосфорилированными остатками Tyr315 и Tyr319, а также промоделирована активационная петля киназного домена.

Материалы и методы исследования. Атомистическую структурную модель полноцепочечного нефосфорилированного белка ZAP-70_YY получали с использованием комбинации программы I-TASSER [4] и GalaxyRefine2 [5]. Начальную модель фосфорилированного белка ZAP-70_rY315rY319rY493 получали с использованием сервера Vienna-PTM [5] с опцией активированной минимизации. Уточнение модели фосфорилированного белка ZAP-70 осуществляли с использованием метода молекулярной динамики в рамках программного пакета GROMACS [6] и силового поля GROMOS 54a7 [7], позволяющего рассматривать фосфорилированные Tyr. Рассматривали поведение фосфорилированного ZAP-70 в NPT ансамбле на интервале 100 нс реального времени. Финальный снимок рассматривали в качестве репрезентативной структуры.

Результаты и их обсуждение. Атомистическая структурная модель белка ZAP-70, фосфорилированного по тирозинам 315, 319, 493, полученная с использованием сервера Vienna-PTM с последующим уточнением методом молекулярной динамики, и ее структурное наложение на атомистическую структурную модель нефосфорилированного белка ZAP-70 (ZAP-70_YY), полученную с использованием программ I-Tasser [4] и GalaxyRefine2 [5], приведены на рисунке (b и c). Увеличенное изображение активационного участка киназного домена приведено на рисунке d. Расчет показывает, что фосфорилированный по остаткам Tyr315, Tyr319, Tyr493 ZAP-70 стабилизирует активационную петлю киназного домена через образование водородных связей pTyr493 с Asp489 и Asp490, а также через образование солевых мостиков между pTyr493 и Arg460. Мы предполагаем, что такая стабилизация активационной петли киназного домена делает возможным последующее фосфорилирование белков LAT



Структурная модель активации ZAP-70: *a* – доменная организация ZAP-70; *b* – структурное наложение фосфорилированного и нефосфорилированного ZAP-70; *c* – увеличенное изображение структурного наложения фосфорилированного и нефосфорилированного ZAP-70; *d* – увеличенное изображение киназного домена фосфорилированного ZAP-70. Показаны pTyr493, а также Asp489, Asp490 и Arg460, образующие полярные контакты с pTyr493. Полярные контакты (водородные связи и солевые мостики), образуемые Tyr493 показаны черным пунктиром

Structural model of the ZAP-70 activation: *a* – domain organization of ZAP-70; *b* – structural superposition of phosphorylated and unphosphorylated ZAP-70; *c* – closer view of structural superposition of phosphorylated and unphosphorylated ZAP-70; *d* – closer view of the phosphorylated ZAP-70 kinase domain. Shown are: pTyr493, and Asp489, Asp490, Arg460, forming polar contacts with pTyr493. The polar contacts (H-bonds and salt bridges) that are formed by pTyr493 are shown by black dashed lines

и SLP-76 активированным киназным доменом киназы ZAP-70. В соответствии с этой моделью можно предположить, что роль фосфорилирования Tyr315 и Tyr319 заключается в разведении N-SH2 и C-SH2 доменов на расстояние, создающее топологическую комплементарность по отношению к ITAM-мотивам димера CD3 ζ , необходимое для связывания, которое приводит к рекрутированию ZAP-70 к плазматической мембране T-клетки, где осуществляется фосфорилирование Tyr493 киназой Lck.

Заключение. Проведенные расчеты позволяют заключить, что фосфорилирование Tyr493 приводит к стабилизации активационной петли киназного домена киназы ZAP-70, создавая конформацию ZAP-70, необходимую для фосфорилирования LAT и SLP-76 киназой ZAP-70

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Б20-120).

Acknowledgements. The work has been sponsored by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Grant Б20-120).

Список использованных источников

1. Mariuzza, R. A. The structural basis of T-cell receptor (TCR) activation: An enduring enigma / R. A. Mariuzza, P. Agnihotri, J. Orban // *J. Biol. Chem.* – 2020. – Vol. 295, N 4. – P. 914–925. <https://doi.org/10.1074/jbc.rev119.009411>
2. Structural basis for the inhibition of tyrosine kinase activity of ZAP-70 / S. Deindl [et al.] // *Cell.* – 2007. – Vol. 129, N 4. – P. 735–746. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2007.03.039>
3. Structural basis for activation of ZAP-70 by phosphorylation of the SH2-kinase linker / Q. Yan [et al.] // *Mol. Cell Biol.* – 2013. – Vol. 33, N 11. – P. 2188–2201. <https://doi.org/10.1128/mcb.01637-12>
4. Roy, A. I-TASSER: a unified platform for automated protein structure and function prediction / A. Roy, A. Kucukural, Y. Zhang // *Nat. Protoc.* – 2010. – Vol. 5, N 4. – P. 725–738. <https://doi.org/10.1038/nprot.2010.5>
5. Heo, L. GalaxyRefine: Protein structure refinement driven by side-chain repacking / L. Heo, H. Park, C. Seok // *Nucleic Acids Res.* – 2013. – Vol. 41, N W1. – P. W384–W388. <https://doi.org/10.1093/nar/gkt458>
6. Margreitter, C. Vienna-PTM web server: a toolkit for MD simulations of protein post-translational modifications / C. Margreitter, D. Petrov, B. Zagrovic // *Nucleic Acids Res.* – 2013. – Vol. 41, N W1. – P. W422–W426. <https://doi.org/10.1093/nar/gkt416>
7. GROMACS 4.5: a high-throughput and highly parallel open source molecular simulation toolkit / S. Pronk [et al.] // *Bioinformatics.* – 2013. – Vol. 29, N 7. – P. 845–854. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btt055>
8. A Systematic Framework for Molecular Dynamics Simulations of Protein Post-Translational Modifications / D. Petrov [et al.] // *PLOS Computational Biology.* – 2013. – Vol. 9, N 7. – Art. e1003154. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003154>

References

1. Mariuzza R. A., Agnihotri P., Orban J. The structural basis of T-cell receptor (TCR) activation: An enduring enigma. *Journal of Biological Chemistry*, 2020, vol. 295, no. 4, pp. 914–925. <https://doi.org/10.1074/jbc.rev119.009411>
2. Deindl S., Kadlec T. A., Brdicka T., Cao X., Weiss A., Kuriyan J. Structural basis for the inhibition of tyrosine kinase activity of ZAP-70. *Cell*, 2007, vol. 129, no. 4, pp. 735–746. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2007.03.039>
3. Yan Q., Barros T., Vesperas P. R., Deindl S., Kadlec T. A., Weiss A., Kuriyan J. Structural basis for activation of ZAP-70 by phosphorylation of the SH2-kinase linker. *Molecular and Cellular Biology*, 2013, vol. 33, no. 11, pp. 2188–2201. <https://doi.org/10.1128/mcb.01637-12>
4. Roy A., Kucukural A., Zhang Y. I-TASSER: a unified platform for automated protein structure and function prediction. *Nature Protocols*, 2010, vol. 5, no. 4, pp. 725–738. <https://doi.org/10.1038/nprot.2010.5>
5. Heo L., Park H., Seok C. GalaxyRefine: Protein structure refinement driven by side-chain repacking. *Nucleic Acids Research*, 2013, vol. 41, no. W1, pp. W384–W388. <https://doi.org/10.1093/nar/gkt458>
6. Margreitter C., Petrov D., Zagrovic B. Vienna-PTM web server: a toolkit for MD simulations of protein post-translational modifications. *Nucleic Acids Research*, 2013, vol. 41, no. W1, pp. W422–W426. <https://doi.org/10.1093/nar/gkt416>
7. Pronk S., Páll S., Schulz R., Larsson P., Bjelkmar P., Apostolov R., Shirts M. R., Smith J. C., Kasson P. M., van der Spoel D., Hess B., Lindahl E. GROMACS 4.5: a high-throughput and highly parallel open source molecular simulation toolkit. *Bioinformatics*, 2013, vol. 29, no. 7, pp. 845–854. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btt055>
8. Petrov D., Margreitter C., Grandits M., Oostenbrink C., Zagrovic B. A Systematic Framework for Molecular Dynamics Simulations of Protein Post-Translational Modifications. *PLOS Computational Biology*, 2013, vol. 9, no. 7, art. e1003154. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003154>

Информация об авторах

Урбан Виктор Андреевич – мл. науч. сотрудник. Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: urban@ibp.org.by.

Вересов Валерий Гаврилович – д-р биол. наук, гл. науч. сотрудник. Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: veresov@ibp.org.by.

Information about the authors

Urban Viktor A. – 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: urban@ibp.org.by.

Veresov Valery G. – D. Sc. (Biology), Chief 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: veresov@ibp.org.by.

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

УДК 631.524.86:635.21:632.3/4:577.21.08
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-41-50>

Поступило в редакцию 23.06.2022
Received 23.06.2022

**Е. В. Воронкова, В. И. Лукша, Ю. В. Полюхович, О. Н. Гукасян,
В. М. Жарич, А. П. Ермишин**

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

МУЖСКАЯ ФЕРТИЛЬНОСТЬ РАСТЕНИЙ СОРТОВ КАРТОФЕЛЯ С РАЗЛИЧНЫМ ТИПОМ ЦИТОПЛАЗМ

(Представлено академиком Л. В. Хотылёвой)

Аннотация. Для картофеля как вегетативно размножаемой культуры характерно преобладание сортов и родительских линий с пониженной мужской фертильностью. В последние годы отмечается рост доли мужски стерильных сортов, что связывают с широким использованием в селекции межвидовых гибридов, имеющих цитоплазмы стерильного типа. Это ведет к сужению генетической базы современных сортов картофеля, так как ограничивает выбор опылителей для комбинативной селекции. Целью работы являлась оценка показателей мужской фертильности 130 сортов картофеля из коллекции Института генетики и цитологии НАН Беларуси и определение типа их цитоплазм с помощью набора молекулярных маркеров. Результаты исследования предполагается использовать для выделения сортов-опылителей для традиционной селекции картофеля, а также отбора сортов для получения первичных дигаметоидов картофеля с фертильным типом цитоплазмы, пригодных для гетерозисной селекции на диплоидном уровне. Установлено, что в коллекции преобладают образцы с цитоплазмой Т- и D-типа (46,0 и 35,4 % соответственно), доля образцов с типом цитоплазмы W составила 18,5 %. Наибольшее число эффективных опылителей выделено среди образцов с цитоплазматическим типом T/β (44,6 %). По комплексу селекционных признаков выбраны как наиболее перспективные для названных выше целей сорта с цитоплазмой этого типа Аксамит, Бриз, Дубрава, Уладар, Alwara, Ausonia, Carlita, Fresco, Labadia, Latona, Liu, Lyra, Quarta, Satina, Sissi. В изученной нами коллекции представлены сорта с цитоплазмой D/α. Около трети из них (32,6 %) были способны образовывать функционально фертильную пыльцу (ФФП), однако уровень ФФП был, как правило, невысоким. Тем не менее, сорта Башкирский, Дельфин, Olga, Ponto формировали пыльцу с фертильностью, достаточной для гарантированного получения семян. Большинство изученных сортов с типами цитоплазмы W/α, W/β и W/γ были мужски стерильны. Однако и среди них выявлены сорта Атлант и Весна Белая, способные образовывать функционально фертильную пыльцу.

Ключевые слова: сорта картофеля *Solanum tuberosum*, цитоплазматический тип, функциональная фертильность пыльцы (ФФП), ПЦР-анализ

Для цитирования. Мужская фертильность растений сортов картофеля с различным типом цитоплазм / Е. В. Воронкова [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 1. – С. 41–50. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-41-50>

**Elena V. Voronkova, Victoria I. Luksha, Julia V. Poliukhovich, Olga N. Gukasian,
Victor M. Zharich, Alexander P. Yermishin**

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

MALE FERTILITY OF VARIETIES OF POTATO WITH DIFFERENT CYTOPLASMA TYPE

(Communicated by Academician Lubov V. Khotyleva)

Abstract. The predominance of varieties and parental lines having low male fertility is a characteristic feature of potatoes as a culture with asexual reproduction. The growth of the share of male sterile varieties has been recently noticed as a result of use in breeding interspecific hybrids with sterile-type cytoplasm. It leads to narrowing the genetic basis of modern potato varieties since it limits the choice of pollinators for breeding. The objectives of this research were to assess male fertility characters of 130 potato varieties from the collection of the Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus and identify their cytoplasm type using the set of DNA markers. The obtained results are intended for selection of pollinators for conventional breeding of potato, as well as of varieties for production of dihaploids with fertile-type cytoplasm suitable for hybrid breeding at the diploid level. It was revealed that the accessions with T- and D-type cytoplasm prevailed in the collection (46.0 and 35.4 %, respectively), the share of the accessions with W-type cytoplasm was 18.5 %. Most of the effective pollinators were selected among the varieties having T/β-type cytoplasm (44.6 %). The varieties Aksamit, Briz, Dubrava, Uladar, Alwara, Ausonia, Carlita, Fresco, Labadia, Latona, Liu, Lyra, Quarta, Satina, Sissi with this cytoplasm type were selected as most promising for our purposes according to the combination of breeding

characters. The potato varieties with D/ α -type cytoplasm were present in the collection under study. Approximately one third (32.6 %) was able to produce functionally fertile pollen (PFF), however the level of its fertility was as a rule low. Nevertheless, the varieties Bashkirski, Delfin, Olga and Ponto formed pollen with PFF suitable to guarantee seed production in crosses. Most of the studied varieties with W/ α -, W/ β -, and W/ γ -type cytoplasm were male sterile. The varieties Atlant and Vesna Belaya were revealed among them that were able to produce functionally fertile pollen.

Keywords: potato varieties *Solanum tuberosum*, cytoplasmic types, pollen functional fertility, PCR-analysis

For citation. Voronkova E. V., Luksha V. I., Poliukhovich Yu. V., Gukasian O. N., Zharich V. M., Yermishin A. P. Male fertility of varieties of potato with different cytoplasm type. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 1, pp. 41–50 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-41-50>

Введение. Мужская фертильность – один из важнейших селекционных признаков для большинства сельскохозяйственных растений. У картофеля, размножаемого вегетативно, этот признак, как правило, не рассматривается селекционерами в качестве приоритетного [1; 2]. За многие годы традиционной селекции картофеля сформировался генофонд, насыщенный генами, которые оказывают неблагоприятное влияние на его проявление [1; 2]. Кроме того, установлено, что типы цитоплазм (цитоплазмы хлоропластов и митохондрий), характерные для современных сортов картофеля, не являются оптимальными для формирования фертильной пыльцы [3]. В последние годы в мировом сортименте картофеля наблюдается рост доли мужски стерильных генотипов [3–5]. Это ограничивает выбор родительских форм для комбинативных скрещиваний, что ведет к сужению генетической базы исходного селекционного материала. Одной из причин возникновения такой ситуации называют широкое вовлечение в селекцию межвидовых гибридов, полученных с участием диких видов картофеля, имеющих цитоплазм, вызывающий при взаимодействии с ядерными генами культурного картофеля цитоплазматическую мужскую стерильность (ЦМС). Оценка коллекций сортов картофеля по типам цитоплазм и признакам мужской фертильности имеет определенное практическое значение, так как позволяет расширить круг сортов-опылителей, а также дает возможность прогнозировать появление перспективных для селекции мужски фертильных гибридов в потомстве отобранных сортов при использовании их в качестве материнских форм.

Другим аспектом, указывающим на важную роль подобных исследований, является создание возможностей для получения фертильного диплоидного селекционного материала на основе культурного картофеля. В отличие от традиционной селекции новое направление селекции картофеля, основанное на создании диплоидных инбредных линий для получения гетерозисных гибридов, размножаемых семенами [6], рассматривает признак мужской фертильности как один из первостепенных. Это перспективное направление активно развивается в последние годы в ведущих научных и селекционных центрах по картофелю. Дигаплоиды *S. tuberosum*, как правило, стерильны или имеют низкую мужскую фертильность вследствие инбредной депрессии [1; 7]. Однако их стерильность может быть обусловлена и цитоплазматическими факторами. В связи с этим учет типа цитоплазмы при выборе сортов картофеля для получения дигаплоидов имеет большое значение, так как позволяет исключить возможный негативный эффект цитоплазмы на показатели фертильности диплоидного селекционного материала.

Т. Hosaka, R. Sanetomo [8] предложили номенклатуру генетических типов цитоплазм картофеля, основанную на результатах ПЦР-анализа с применением ряда маркеров хлоропластной и митохондриальной ДНК изучаемых образцов. Согласно этой номенклатуре по совокупности использованных пластидных маркеров выделяются шесть типов цитоплазм: М, Р, А, W, Т и D. Митохондриальные маркеры обозначаются греческими буквами α , β , γ и т. д. Сорта культурного картофеля (*S. tuberosum* ssp. *tuberosum*) в большинстве случаев имеют цитоплазму типа Т, унаследованную от первых интродукций картофеля из Южной Америки. С помощью межвидовой гибридизации в сорта интрогрессированы цитоплазмы типа Р (от диплоидных культиваров группы Andigenum, а именно *S. phureja*), типа D (от *S. demissum*) и типа W (например, от *S. stoloniferum*).

С цитоплазмой типа Т/ β , характерной для большинства современных сортов картофеля, связывают различные нарушения развития генеративных органов и формирование abortивной пыльцы [9]. Сорта картофеля с цитоплазмой D-типа способны формировать жизнеспособную

пыльцу, однако она оказывается не способной к прорастанию на рыльце пестика, т. е. является функционально стерильной [10]. С цитоплазмой *W/γ*, унаследованной от *S. stoloniferum* и других родственных видов, коррелирует ЦМС типа тетрадной стерильности [11]. С помощью методики Т. Hosaka, R. Sanetomo (2012) проведено изучение больших коллекций сортов картофеля, выявившее преобладание в них образцов, имеющих типы цитоплазм Т, D и W [3; 5; 8].

Для исследований, проводимых в лаборатории генетики картофеля Института генетики и цитологии НАН Беларуси, данные о цитоплазматических типах сортов картофеля представляют интерес по ряду причин. Лаборатория в течение многих лет развивает перспективное направление селекции картофеля, связанное с отбором на диплоидном уровне [12]. В результате селекции на диплоидном уровне с привлечением межвидовой гибридизации получен ряд ценных линий, несущих несколько генов устойчивости к болезням, в частности, гены высокой долговременной устойчивости фитофторозу, интрогрессированные от мексиканских диких видов картофеля [12]. Полученные на их основе с помощью митотического удвоения хромосом тетраплоидные линии представляют значительный интерес для селекции, так как имеющиеся у них гены присутствуют, как минимум, в виде двух копий, что существенно повышает вероятность переноса их потомству от скрещивания с сортами картофеля. Однако в силу своего происхождения эти линии низко фертильны, что предполагает их использование только в качестве материнских форм. Кроме того, для их потомства от скрещивания с сортами характерны позднеспелость, много- и мелко клубневость. Следовательно, для них желательно использовать сорта-опылители, сочетающие высокий уровень мужской фертильности с раннеспелостью и крупноклубневостью. Кроме того, эти сорта должны нести гены устойчивости к болезням и вредителям, прежде всего, к нематодам, раку картофеля и вирусам, что позволит получать гибридное потомство с комплексной устойчивостью к патогенам. Использование сортов картофеля, отобранных по типу цитоплазмы, для расширения существующей коллекции путем получения новых дигаплоидов повысит потенциал мужской фертильности исходного материала для гетерозисной селекции на диплоидном уровне.

Целью настоящего исследования являлась оценка показателей мужской фертильности 130 сортов картофеля из коллекции Института генетики и цитологии НАН Беларуси и определение типа их цитоплазм с помощью набора молекулярных маркеров. На основании полученных результатов, а также отбора по признакам раннеспелости, крупноклубневости и наличию ДНК маркеров генов устойчивости к болезням и вредителям предполагалось выделить сорта-опылители для использования в скрещиваниях с полученными в лаборатории митотически удвоенными мультиплексными линиями, выделить сорта для получения первичных дигаплоидов картофеля с фертильным типом цитоплазмы, пригодных для гетерозисной селекции на диплоидном уровне.

Материалы и методы исследования. Материалом исследований служили 130 сортов картофеля из коллекции Института генетики и цитологии НАН Беларуси.

Выделение и очистку ДНК образцов для последующего ПЦР-анализа на наличие специфических маркеров, характеризующих типы цитоплазм, осуществляли из зеленых свежесобранных или замороженных и хранившихся при -20°C листьев, взятых из среднего яруса куста. Для выделения и очистки тотальной ДНК картофеля использовали готовые наборы реагентов для выделения ДНК из растительной ткани («Plant DNA Preparation Kit» производства фирмы Jena Bioscience, Германия) по методике производителя с модификациями.

Анализ типов цитоплазм осуществляли согласно методике, разработанной с использованием пяти типов маркеров (Т, S, SAC, D и А) [8]. Для получения маркерных фрагментов при приготовлении реакционной смеси для ПЦР использовали Taq-ДНК-полимеразу и сопутствующие реактивы производства «ДИАЛАТ Ltd» (Москва, Россия) или ОДО «Праймтех» (Минск, Беларусь). Праймеры синтезированы в ОДО «Праймтех». Реакционная смесь объемом 20 мкл включала 100 нг препарата ДНК в конечном объеме, 2,5 мМ хлорида магния, 0,25 мМ каждого из dNTP, праймеры (прямой и обратный) в концентрации 0,4 мкМ (400 нМ); Taq-ДНК-полимеразу в количестве 1 ед. с буфером $10\times$ для ПЦР без MgCl_2 – 0,1 мкл/1 мкл ПЦР смеси (10 % от объема смеси) и с доведением объема смеси до конечного деионизированной водой. Реакцию осуществляли в программируемом термоциклере GenAmp System 2700 при следующем режиме амплификации: один

цикл 10 мин при 95 °С, далее 35 циклов по 30 с при 94 °С, отжиг ДНК в течение 30 с при 60 °С и элонгация в течение 1 мин при 72 °С, заключительная элонгация – один цикл в течение 5 мин при 72 °С. Для выявления маркеров SAC и A продукты амплификации подвергали рестрикции эндонуклеазой *Bam*HI в соответствии с рекомендациями производителя фермента (Thermo Scientific, ЕС) в течение 3 ч в твердотельном термостате при температуре 37 °С.

Для определения митохондриального типа цитоплазмы использовали маркер ALM_4/ALM_5 [11] по наличию фрагмента длиной 2400 п. н. для типа α , 1600 п. н. для типа β и отсутствия обоих фрагментов для типа γ . Состав реакционной смеси – такой же, как и для пластидных маркеров. Режим амплификации: один цикл 10 мин при 95 °С, далее 35 циклов по 30 с при 94 °С, отжиг ДНК в течение 30 с при 57 °С и элонгация в течение 1,5 мин при 72 °С, заключительная элонгация – один цикл в течение 5 мин при 72 °С.

Разделение продуктов амплификации проводили в 2 %-ном агарозном геле в трис-ацетатном буфере (ТАЕ) в течение 1,5–2 ч при напряжении 80 В и силе тока 6 мА. Для определения размера амплифицированных фрагментов использовали маркеры молекулярного веса 100–1000 п. н. (DIALAT Ltd, Россия и «СибЭнзим», Россия). Визуализацию результатов электрофореза проводили с использованием трансиллюминатора или прибора для документирования гелей.

С целью оценки параметров мужской фертильности проводили сбор данных на пике цветения изучаемых образцов. Интенсивность цветения оценивали в баллах от 0 (отсутствие цветения, опадение бутонов) до 3 (обильное цветение в несколько ярусов). Пыльцевую продуктивность (количество пыльцы с 10 цветков) оценивали в баллах от 0 (полное отсутствие пыльцы) до 3 (обильное образование пыльцы). Жизнеспособность пыльцы определяли на препаратах свежесобранной, окрашенной 4 %-ным ацетокармином пыльцы (процент окрашенных пыльцевых зерен). Стерильными считали растения, которые не образовывали пыльцу или формировали полностью abortивную пыльцу, а также растения, формирующие менее 20 % жизнеспособных пыльцевых зерен.

Для определения функциональной фертильности пыльцы (ФФП) производили проращивание пыльцы *in vitro* по методике [13]. Пыльцу проращивали во влажных камерах при комнатной температуре (20–22 °С) в течение 2–2,5 ч, после чего производили подсчет проросших пыльцевых зерен. Учитывали по 300 зерен с образца в нескольких полях зрения микроскопа (увеличение $\times 600$). Функциональную фертильность пыльцы определяли как отношение количества проросшей пыльцы к количеству учтенных пыльцевых зерен, выраженное в процентах. Низко фертильными считали формы с ФФП ниже 5 %, средне фертильными – 5–10 %, высоко фертильными – выше 10 %.

Результаты и их обсуждение. Анализ сортов, представленных в коллекции Института генетики и цитологии НАН Беларуси, показал, что, несмотря на разное происхождение образцов (в коллекции представлены сорта селекции Республики Беларусь, Российской Федерации, Украины, Польши, Германии, Нидерландов, США), разнообразие в ней цитоплазматических типов ограничено тремя: T, D и W. Сорта картофеля с цитоплазмами типов A, P и M выявлено не было. Как видно из данных табл. 1–3, преобладающими в коллекции оказались образцы с цитоплазмой T-типа (46 %) и D-типа (35,4 %). Внутри этих типов подавляющее большинство приходилось, соответственно, на тип T/ β (96,7 % от всех T-генотипов) и D/ α (97,8 % от всех D-генотипов). Митохондриальный маркер γ среди образцов данных типов цитоплазмы встречался крайне редко. Доля образцов с цитоплазмой W-типа составила 18,5 %. У образцов с этим типом цитоплазмы наблюдали разнообразие митохондриальных маркеров, более половины из них принадлежало типу γ (58,33 % W). В целом распределение сортов по типам цитоплазмы в изученной нами коллекции оказалось аналогичным тому, что наблюдали исследователи при изучении других коллекций сортов картофеля [3–5; 8; 14].

Наибольшее количество эффективных опылителей (ФФП 10 % и выше) было выявлено среди сортов с цитоплазмой типа T/ β (табл. 1), что подтверждает данные литературы [3; 4; 8; 14]. Именно среди них были отобраны сорта картофеля, которые предполагается использовать в наших исследованиях в качестве опылителей в скрещиваниях с митотически удвоенными родительскими линиями, а также с целью получения новых дигаплоидов для целей гибридной селекции на ди-

плоидном уровне. Это сорта: Аксамит, Бриз, Дубрава, Уладар, Alwara*, Ausonia, Carlita, Fresco, Labadia*, Latona*, Liu, Lyra, Quarta, Satina, Sissi (звездочкой помечены сорта, отобранные по данным литературы и которые в скрещиваниях 2019 г. подтвердили свою высокую фертильность). Все они способны к относительно обильному цветению (при выращивании в теплице с выведением столонов), формированию достаточно большого количества функционально фертильной пыльцы, имеют цитоплазму, на которой возможно получение мужски фертильного потомства. Они также отвечают другим вышеназванным требованиям: относятся к группам ранних, средне-ранних или среднеспелых сортов, имеют высокую клубневую продуктивность (в основном за счет крупноклубности) и являются носителями маркеров генов устойчивости к основным болезням и вредителям. Очевидно, они могут быть использованы как в качестве опылителей в скрещиваниях с митотически удвоенными мультиплексными родительскими линиями, так и в качестве материнских форм в скрещиваниях с гаплопродюсерами с целью получения дигаплоидов.

Т а б л и ц а 1. Показатели мужской фертильности сортов картофеля с цитоплазмой Т-типа

T a b l e 1. Indicators of male fertility of potato varieties with T-type cytoplasm

Сорт Variety	Тип цитоплазмы Type of cytoplasm	Интенсивность цветения, баллы Flowering intensity, points	Пыльцевая продуктивность, баллы Pollen productivity, points	ФФП, % Pollen Functional Fertility, %
Аksamит	T/β	1	3	25
Ареса	T/β	1	2	30
Бриз	T/β	1	2	30
Бронницкий	T/β	1	2	10–20
Добро	T/β	1	3	10
Дубрава	T/β	2	Н. д.	Н. д.
Журавинка	T/β	2	Н. д.	Н. д.
Загадка Питера	T/β	1	2	2
Зарево	T/β	3	1	Абортивная
Лилея	T/β	1	1	10
Луговской	T/β	1	1	Абортивная
Максимум	T/β	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Орбита	T/β	1	1	10
Оредежский	T/β	1	1	0
Прамень	T/β	2	1	Абортивная
Резерв	T/γ	1	2	10
Свитанок Киевский	T/β	3	3	30–50
Синтез	T/β	1	1	15
Сузорье	T/β	3	1	5
Талисман	T/β	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Уладар	T/β	1	1	20
Явар	T/β	2	3	10
Arnika	T/β	2	3	20–30
Ausonia	T/β	0	–	–
Berber	T/β	1	2	20
Binella	T/β	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Carlita	T/β	2	1–2	5–20
Corine	T/β	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Fabula	T/β	1	0	–
Fresco	T/β	1	2	30
Gala	T/β	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Katahdin	T/β	1	2	30
Kennebec	T/β	1	1	0
Kormoran	T/β	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Lambda	T/β	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Lemhi Russet	T/β	3	2–3	20–25

Окончание табл. 1

Сорт Variety	Тип цитоплазмы Type of cytoplasm	Интенсивность цветения, баллы Flowering intensity, points	Пыльцевая продуктивность, баллы Pollen productivity, points	ФФП, % Pollen Functional Fertility, %
Liu	T/β	1	Н. д.	20
Lyra	T/β	1	3	30–60
Miranda	T/β	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Monalisa	T/β	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Monza	T/β	1	1	1
Nadezda	T/γ	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Nikita	T/β	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Norchip	T/β	1	1	0
Parwita	T/β	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Planta	T/β	1	0–1	Абортивная
Prof Wohltmann	T/β	1	1–3	5–50
Quarta	T/β	1	2	30–50
Raja	T/β	1	1	Н. д.
Red Pontiac	T/β	1	1	9,6
Resy	T/β	2	0	–
Rodeo	T/β	3	1–2	1–10
Russet Burbank	T/β	1	1	0
Sante	T/β	1	0	–
Sarpo Mira	T/β	2	2	1–5
Satina	T/β	2	1	30–40
Sissi	T/β	2	2	10
Superior	T/β	1	0	–
Tajfun	T/β	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Vineta	T/β	Н. д.	Н. д.	Н. д.

Примечание. Н. д. – нет данных.

Note. Н. д. – no data.

С цитоплазмой типа D, унаследованной от мексиканского гексаплоидного дикого вида *S. demissum*, связывают появление сортов картофеля, образующих жизнеспособную, но функционально неактивную пыльцу [8; 10]. Тем не менее, в литературе имеются сведения об исключениях из этого правила [4; 8]. В изученной нами коллекции представлены сорта с цитоплазмой D/α (табл. 2). Около трети из них (32,6 %) были способны образовывать функционально активную пыльцу, однако значения ФФП были, как правило, невысокие (на уровне 5 %). Они могут быть привлечены в качестве опылителей, но для успеха гибридизации, по нашему опыту, потребуются достаточно большие объемы скрещиваний. Сорта Башкирский, Дельфин, Olga, Ponto формировали пыльцу с относительно высокой функциональной фертильностью, достаточной для гарантированного получения семян в совместимых скрещиваниях. Таким образом, полученные нами данные указывают на возможность выделения отдельных мужски фертильных генотипов с цитоплазмой типа D/α. Названные выше сорта могут быть рекомендованы в качестве опылителей для традиционной селекции картофеля. Однако они не отвечают в полной мере некоторым требованиям к сортам для получения дигаметоидов.

Считается, что сорта или гибриды с цитоплазмой типа W/γ, унаследованной от мексиканского дикого аллотетраплоидного вида картофеля *S. stoloniferum*, как правило, мужски стерильны и их можно использовать в селекции только в качестве материнских форм [3–5; 8; 14]. Полученные нами данные в целом подтверждают этот вывод (табл. 3). Тем не менее, выявлены сорта Атлант и Весна Белая (8,3 % сортов цитоплазматического типа W), которые были способны образовывать функционально фертильную пыльцу. Появление мужски фертильных образцов с цитоплазмой W/γ связывают с тем, что они имеют в своей родословной с материнской стороны образцы южноамериканских видов *S. vernei* или *S. chacoense*, у которых также были выявлены W/γ-типы цитоплазмы [7; 11].

Т а б л и ц а 2. Показатели мужской фертильности сортов картофеля с цитоплазмой D-типа

T a b l e 2. Indicators of male fertility of potato varieties with D-type cytoplasm

Сорт Variety	Тип цитоплазмы Type of cytoplasm	Интенсивность цветения, баллы Flowering intensity, points	Пыльцевая продуктивность, баллы Pollen productivity, points	ФФП, % Pollen Functional Fertility, %
Акцент	D/α	1	Н. д.	5
Альпинист	D/α	1	2–3	5
Архидзэ	D/α	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Башкирский	D/γ	2	2–3	10
Белоснежка	D/ α	1	2	1
Блакит	D/ α	2	2–3	5
Верас	D/ α	2	2	1
Веснянка	D/ α	2	2	5
Дельфин	D/ α	1	1	10
Дина	D/ α	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Жаворонок	D/ α	2	2	5–7
Зорачка	D/ α	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Колорит	D/ α	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Крыница	D/ α	1	1	Абортивная
Лазурит	D/α	1	Н. д.	Н. д.
Манифест	D/α	2	1	1
Невский	D/α	0	Н. д.	Н. д.
Нептун	D/α	1	2	1
Никулинский	D/α	2	2	Абортивная
Рагнеда	D/α	3	2	4
Сказка	D/α	3	3	5
Скарб	D/α	1	1	5
Снегирь	D/α	1	2	0
Спадчына	D/α	1	1	5
Фальварак	D/α	2	2	2
Чарауник	D/α	2	2	1
Чародей	D/α	2	3	5
Янка	D/α	2	3	2
Adora	D/α	1	Н. д.	Н. д.
Adretta	D/α	1	1	5
Albatros	D/α	1	3	2
Anosta	D/α	1	3	Абортивная
Aula	D/α	0	–	–
Carla	D/α	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Carola	D/α	2	1	Абортивная
Kama	D/α	3	2	Абортивная
Karlana	D/α	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Koretta	D/α	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Korona	D/α	3	2	1
Krasa	D/α	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Mariella	D/α	1	2	5
Meridian	D/ α	1	3	Абортивная
Molli	D/α	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Olga	D/α	1	1–3	5–15
Ponto	D/α	Н. д.	3	30
Saphir	D/α	Н. д.	1–2	1

Примечание. Н. д. – нет данных.

Note. Н. д. – no data.

Т а б л и ц а 3. Показатели мужской фертильности сортов картофеля с цитоплазмой W-типа

T a b l e 2. Indicators of male fertility of potato varieties with W-type cytoplasm

Сорт Variety	Тип цитоплазмы Type of cytoplasm	Интенсивность цветения, баллы Flowering intensity, points	Пыльцевая продуктивность, баллы Pollen productivity, points	ФФП, % Pollen Functional Fertility, %
Атлант	W/γ	1	3	30
Весна Белая	W/γ	2	3	20
Вектар	W/γ	2	1	Абортивная
Ветразь	W/γ	1	1	Абортивная
Здабытак	W/γ	3	1	Абортивная
Каприз	W/β	1	1	Абортивная
Лазарь	W/α	2	2	5
Ласунак	W/α	2	3	2
Метеор	W/γ	1	1	Абортивная
Одиссей	W/β	1	1	Абортивная
Пранса	W/α	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Ресурс	W/γ	1	1	Абортивная
Универсал	W/γ	3	1	Абортивная
Арта	W/α	2	2	0
Arosa	W/γ	Н. д.	1	Абортивная
Assia	W/γ	3	1	Абортивная
Barycz	W/α	1	2	0
Heidrun	W/γ	3	1	0
Impala	W/γ	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Meduza	W/β	3	1	Абортивная
Omulew	W/β	1	1–2	0
Pheasant	W/γ	2	1	Абортивная
Pirola	W/γ	2	1	Абортивная
Rita	W/α	Н. д.	1	Абортивная

Примечание. Н. д. – нет данных.

Note. Н. д. – no data.

Среди сортов с цитоплазмой типа W нами обнаружено несколько образцов, имеющих митохондриальный маркер типа α (без маркера D) (Лазарь, Ласунак, Пранса, Арта, Barycz, Rita), а также маркер типа β (Каприз, Одиссей, Meduza, Omulew) (табл. 3). Эти типы цитоплазм характерны для родственных диких южноамериканских видов картофеля, часто используемых в селекции: *S. acaule*, *S. spagazzinii* и *S. sparsipilum* (= *S. brevicaule*). В литературе есть сведения о мужской фертильности межвидовых гибридов с цитоплазмой типа W/α [4]. Среди образцов изученной нами коллекции с цитоплазмой такого типа только сорта Лазарь и Ласунак оказались способны к образованию низкофертильной пыльцы, остальные образцы с цитоплазмой W/α и W/β были мужски стерильны. Очевидно, несмотря на отдельные исключения, образцы с цитоплазмой W-типа следует считать нежелательными в исследованиях, имеющих целью получение мужски фертильного селекционного материала.

Заключение. На основании результатов молекулярно-генетического анализа типов цитоплазм и оценки показателей мужской фертильности 130 сортов картофеля выделены сорта Аксамит, Бриз, Дубрава, Уладар, Alwara, Ausonia, Carlita, Fresco, Labadia, Latona, Liu, Lyra, Quarta, Satina, Sissi, которые могут быть рекомендованы в качестве эффективных опылителей в скрещиваниях с низко фертильными тетраплоидными источниками ценных генов, в частности с митотически удвоенными родительскими линиями, полученными на основе межвидовых гибридов картофеля. Эти же сорта по комплексу селекционно-ценных признаков пригодны для получения первичных дигаметоидов, обладающих потенциалом фертильности для использования в гибридной селекции на диплоидном уровне. Названные фертильные образцы выделены среди представителей цитоплазматического типа T/β. Среди представителей цитоплазматических типов D и W хотя и возможно выявление мужски фертильных образцов, вероятность такого события достаточно низкая.

Список использованных источников

1. Carroll, C. P. Aspects of male fertility in group *Tuberosum* dihaploids / C. P. Carroll, R. J. Low // *Potato Research*. – 1976. – Vol. 19, N 2. – P. 109–121. <https://doi.org/10.1007/bf02360411>
2. Diploid potato germplasm derived from wild and land race genetic resources / K. Watanabe [et al.] // *American Potato J.* – 1994. – Vol. 71, N 9. – P. 599–604. <https://doi.org/10.1007/bf02851525>
3. Sanetomo, R. Cytoplasmic genome types of European potatoes and their effects on complex agronomic traits / R. Sanetomo, C. Gebhardt // *BMC Plant Biology*. – 2015. – Vol. 15, N 6. – Art. 162. <https://doi.org/10.1186/s12870-015-0545-y>
4. Использование молекулярных маркеров R генов и типов цитоплазмы при интрогрессивной гибридизации диких полиплоидных мексиканских видов картофеля / Н. М. Зотева [и др.] // *Сельскохозяйственная биология*. – 2017. – Т. 52, № 5. – С. 964–975. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.5.964rus>
5. Cytoplasmic diversity in potato breeding: case study from the International Potato Center / E. Mihovilovich [et al.] // *Mol. Breed.* – 2015. – Vol. 35, N 6. – Art. 137. <https://doi.org/10.1007/s11032-015-0326-1>
6. Towards F1 hybrid seed potato breeding / P. Lindhout [et al.] // *Potato Research*. – 2011. – Vol. 54, N 4. – P. 301–312. <https://doi.org/10.1007/s11540-011-9196-z>
7. Yeh, B. P. Meiosis in *Solanum tuberosum* haploids and haploid–haploid F1 hybrids / B. P. Yeh, S. J. Peloquin, R. W. Hougas // *Canadian J. Genet. Cytol.* – 1964. – Vol. 6, N 4. – P. 393–402. <https://doi.org/10.1139/g64-050>
8. Hosaka, K. Development of a rapid identification method for potato cytoplasm and its use for evaluating Japanese collections / K. Hosaka, R. Sanetomo // *Theor. Appl. Genet.* – 2012. – Vol. 125, N 6. – P. 1237–1251. <https://doi.org/10.1007/s00122-012-1909-4>
9. Grun, P. Evolution of cytoplasmic factors in tetraploid cultivated potatoes (*Solanaceae*) / P. Grun, C. Ochoa, D. Capage // *American J. of Botanic.* – 1977. – Vol. 64, N 4. – P. 412–420. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1977.tb12363.x>
10. Dionne, L. A. Cytoplasmic sterility in derivatives of *Solanum demissum* / L. A. Dionne // *American Potato J.* – 1961. – Vol. 38, N 4. – P. 117–120. <https://doi.org/10.1007/bf02870217>
11. Molecular markers for cytoplasm in potato: male sterility and contribution of different plastid- mitochondrial configurations to starch production / A. Lössl [et al.] // *Euphytica*. – 2000. – Vol. 116, N 3. – P. 221–230. <https://doi.org/10.1023/a:1004039320227>
12. Ермишин, А. П. Создание исходного материала для маркер-опосредованной селекции родительских линий картофеля (*Solanum tuberosum* L.) на диплоидном уровне / А. П. Ермишин, Е. В. Воронкова // *Сельскохозяйственная биология*. – 2017. – Т. 52, № 1. – С. 50–62. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.1.50rus>
13. Pallais, N. Research on the physiology of potato sexual seed production / N. Pallais, N. Fong, D. Berrios // *Proc. Int. conf. "Innovative methods for propagating potatoes"*. CIP Rep. 28th Planning Conf. – Lima, CIP, 1984. – P. 149–168.
14. Hosaka K., Sanetomo R. Application of a PCR-based cytoplasm genotyping method for phylogenetic analysis in potato / K. Hosaka, R. Sanetomo // *American J. Potato Research*. – 2014. – Vol. 91, N 3. – P. 246–253. <https://doi.org/10.1007/s12230-013-9344-x>

References

1. Carroll C. P., Low R. J. Aspects of male fertility in group *Tuberosum* dihaploids. *Potato Research*, 1976, vol. 19, no. 2, pp. 109–121. <https://doi.org/10.1007/bf02360411>
2. Watanabe K., Orrillo M., Iwanaga M., Ortiz R., Freyre R., Perez S. Diploid potato germplasm derived from wild and land race genetic resources. *American Potato Journal*, 1994, vol. 71, no. 9, pp. 599–604. <https://doi.org/10.1007/bf02851525>
3. Sanetomo R., Gebhardt C. Cytoplasmic genome types of European potatoes and their effects on complex agronomic traits. *BMC Plant Biology*, 2015, vol. 15, no. 6, art. 162. <https://doi.org/10.1186/s12870-015-0545-y>
4. Zoteyeva N. M., Antonova O. Yu., Klimenko N. S., Apalikova O. V., Carlson-Nilsson U., Karabitsina Yu. I., Ukhato-va Yu. V., Gavrilenko T. A. Facilitation of introgressive hybridization of wild polyploid Mexican potato species using DNA markers of R genes and of different cytoplasmic types. *Selskokhozhajstvennaja biologija = Agriculture biology*, 2017, vol. 52, no. 5, pp. 964–975 (in Russian). <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.5.964rus>
5. Mihovilovich E., Sanetomo R., Hosaka K., Ordoñez B., Aponte M., Bonierbale M. Cytoplasmic diversity in potato breeding: case study from the International Potato Center. *Molecular Breeding*, 2015, vol. 35, no. 6, art. 137. <https://doi.org/10.1007/s11032-015-0326-1>
6. Lindhout P., Meijer D., Schotte T. Ronald C. B., Hutten R. C. B., Visser R. G. F., van Eck H. J. Towards F1 hybrid seed potato breeding. *Potato Research*, 2011, vol. 54, no. 4, pp. 301–312. <https://doi.org/10.1007/s11540-011-9196-z>
7. Yeh B. P., Peloquin S. J., Hougas R. W. Meiosis in *Solanum tuberosum* haploids and haploid–haploid F1 hybrids. *Canadian Journal of Genetic and Cytology*, 1964, vol. 6, no. 4, pp. 393–402. <https://doi.org/10.1139/g64-050>
8. Hosaka K., Sanetomo R. Development of a rapid identification method for potato cytoplasm and its use for evaluating Japanese collections. *Theoretical and Applied Genetics*, 2012, vol. 125, no. 6, pp. 1237–1251. <https://doi.org/10.1007/s00122-012-1909-4>
9. Grun P., Ochoa C., Capage D. Evolution of cytoplasmic factors in tetraploid cultivated potatoes (*Solanaceae*). *American Journal of Botany*, 1977, vol. 64, no. 4, pp. 412–420. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1977.tb12363.x>
10. Dionne L. A. Cytoplasmic sterility in derivatives of *Solanum demissum*. *American Potato Journal*, 1961, vol. 38, no. 4, pp. 117–120. <https://doi.org/10.1007/bf02870217>
11. Lössl A., Götz M., Braun A., Wenzel G. Molecular markers for cytoplasm in potato: male sterility and contribution of different plastid-mitochondrial configurations to starch production. *Euphytica*, 2000, vol. 116, no. 3, pp. 221–230. <https://doi.org/10.1023/a:1004039320227>

12. Yermishin A. P., Voronkova E. V. Development of initial material for marker assisted potato (*Solanum tuberosum* L.) parental line breeding at the diploid level (review). *Selskokhozhajstvennaja biologija = Agriculture Biology*, 2017, vol. 52, no. 1, pp. 50–62 (in Russian). <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.1.50rus>
13. Pallais N., Fong N., Berrios D. Research on the physiology of potato sexual seed production. *Proceeding of International conference "Innovative methods for propagating potatoes"*. Lima, CIP, 1984, pp. 149–168.
14. Hosaka K., Sanetomo R. Application of a PCR-based cytoplasm genotyping method for phylogenetic analysis in potato. *American Journal of Potato Research*, 2014, vol. 91, no. 3, pp. 246–253. <https://doi.org/10.1007/s12230-013-9344-x>

Информация об авторах

Воронкова Елена Васильевна – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: e.voronkova@igc.by. ORCID: 0000-0001-9747-8622.

Лушка Виктория Ивановна – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.luksha@igc.by.

Полюхович Юлия Владимировна – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yu.paliukhovich@igc.by.

Гукасян Ольга Николаевна – науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Жарич Виктор Михайлович – науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Ермишин Александр Петрович – д-р биол. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Ermishin@igc.by. ORCID: 0000-0002-3106-4926.

Information about the authors

Voronkova Elena V. – Ph. D. (Biology), Leader Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Science of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: e.voronkova@igc.by. ORCID: 0000-0001-9747-8622.

Luksha Victoria I. – Ph. D. (Biology), Senior Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Science of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.luksha@igc.by.

Poliukhovich Julia V. – Ph. D. (Biology), Senior Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Science of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yu.paliukhovich@igc.by.

Gukasian Olga N. – Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Science of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Zharich Victor M. – Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Science of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Yermishin Alexander P. – D. Sc. (Biology), Professor, Head of the Laboratory. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Science of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Ermishin@igc.by. ORCID: 0000-0002-3106-4926.

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

МЕДИЦИНА
MEDICINE

УДК 616.831-009.81:303.052
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-51-58>

Поступило в редакцию 08.09.2022
Received 08.09.2022

**В. А. Лукашевич¹, В. В. Пономарев¹, член-корреспондент С. В. Губкин²,
С. М. Манкевич¹**

¹Белорусская медицинская академия последипломного образования, Минск, Республика Беларусь

²Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**ОЦЕНКА ДВИГАТЕЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ ЗДОРОВЫХ ЛИЦ
ПО ДАННЫМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ КИНЕМАТИКИ**

Аннотация. Актуальной проблемой современной клинической биомеханики остается выделение маркеров сложных движений, позволяющих оценивать сложные двигательные приспособительные реакции вне зависимости от возраста, пола и антропометрических девиаций. Цель исследования: разработать метод анализа двигательных приспособительных реакций человека по биомеханическим маркерам, полученным при выполнении разноплановых кинематических тестов. В исследовании приняли участие 90 добровольцев с правосторонним ведущим кинематическим звеном в возрасте 18,8 [16,8/20,8] лет, с ростом 171,8 [179,2/164,8] см и массой тела 65,3 [76,6/58,5] кг, соотношение мужчин и женщин – 5 : 4. В ходе исследования всем участникам проводили биомеханический анализ с применением системы дистанционного захвата движений «TESLASUIT», а также выполняли разноплановые кинематические тесты. В ходе проведения исследования разработан новый метод анализа двигательных приспособительных реакций человека, основанный на вычислении специфических маркеров времени активной фазы средней угловой девиации и инерциальной кинематики при выполнении стандартизированных кинематических тестов «фронтальная стабильность», «сагиттальная стабильность», «пространственная ориентация» и «идентификация стимула». Установлено, что специфическими ($p < 0,001$) маркерами первого теста являются показатели времени активной фазы, маркеры второго и четвертого тестов связаны с параметрами средней угловой девиации, специфическими индикаторами третьего теста может выступать инерциальная кинематика бедер, голени и стоп.

Ключевые слова: адаптивная кинематика, маркеры адаптивной кинематики, время активной фазы, средняя угловая девиация, инерциальная кинематика

Для цитирования. Оценка двигательной адаптации здоровых лиц по данным пространственно-временной кинематики / В. А. Лукашевич [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 1. – С. 51–58. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-51-58>

**Vladislav A. Lukashevich¹, Vladimir V. Ponomarev¹, Corresponding Member Sergey V. Gubkin²,
Svetlana M. Mankevich¹**

¹Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education, Minsk, Republic of Belarus

²Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**EVALUATION OF MOTOR ADAPTATION OF HEALTHY PERSONS ACCORDING
TO SPACE-TIME KINEMATICS DATA**

Abstract. An important problem of modern clinical biomechanics is to identify complex movement markers that make it possible to evaluate complex motor adaptive reactions regardless of age, gender, and anthropometric deviations. The purpose of the present study was to develop a method for analysis of human motor adaptive reactions based on calculating specific biomechanical markers obtained by performing diverse kinematic tests. The study involved 90 volunteers with a right-leading kinematic side at an age of 18.8 [16.8/20.8] years, with a height of 171.8 [179.2/164.8] cm, a body weight of 65.3 [76.6/58.5] kg, and the ratio of men and women – 5 : 4. During the study, all participants underwent biomechanical analysis using the TESLASUIT remote motion capture suit and performing diverse kinematic tests. In the course of the study, a new method for analyzing human motor adaptive reactions was developed. It is based on calculating specific time markers of the active phase, average angular deviation markers, and inertial kinematic markers. All markers are calculated after each kinematic tests

“frontal stability”, “sagittal stability”, “spatial orientation”, and “stimulus identification”. Our survey revealed that specific ($p < 0.001$) markers of the first test are the time indicators of the active phase, the markers of the second and fourth tests are associated with the average angular deviation parameters, and the specific indicators of the third test can be the inertial kinematics of thighs, legs, and feet.

Keywords: adaptive kinematics, adaptive kinematics markers, active phase time, average angular deviation, inertial kinematics

For citation. Lukashevich V. A., Ponomarev V. V., Gubkin S. V., Mankevich S. M. Evaluation of motor adaptation of healthy persons according to space-time kinematics data. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 1, pp. 51–58 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-51-58>

Введение. Нарушения нейромышечных функций человека затрагивают сферу двигательных приспособительных реакций в виде контроля произвольных двигательных функций и функций непроизвольных двигательных реакций [1]. При некоторых заболеваниях центральной нервной системы, таких как инсульты, психосоциальная дезадаптация неразрывно связана с выраженностью двигательных дефектов, включающих адаптивную кинематику (АДК) [2–4]. Главная проблема объективного анализа данного рода патологии у лиц пожилого возраста заключается в наслоении патофизиомеханических паттернов АДК на уже имеющиеся заболевания опорно-двигательного аппарата [4–6]. В этой ситуации клиническая диагностика с использованием средств оценки биомеханики обусловлена необходимостью обработки большого объема данных с целью поиска релевантных маркеров, отражающих как первичные, так и вторичные нарушения АДК [7; 8]. Также в ходе выполнения реабилитационных программ происходит неселективное восстановление моторных функций, что затрудняет принятие обоснованного решения об эффективности проводимой терапии [4; 9–11].

Ранее авторами были сделаны попытки описания методик и математических алгоритмов обработки массивов данных пространственно-временной биомеханики с целью выявления универсальных механизмов поддержания вертикальной позы в эксперименте с различными средовыми окружениями. При этом вопросы стандартизации исследования и выделения специфических маркеров АДК, устойчивых к антропометрическим неопределенностям, не освещались [12–15].

Таким образом, к настоящему времени актуальной проблемой современной клинической биомеханики остается выделение маркеров сложных движений, позволяющих оценивать АДК вне зависимости от возраста, пола и антропометрических девиаций.

Целью исследования являлась разработка методологии (метода) анализа двигательных приспособительных реакций человека, основанной на расчете специфических биомеханических маркеров, полученных при выполнении разноплановых кинематических тестов.

Материалы и методы исследования. Проведение исследования было одобрено этическим комитетом ГУО «Белорусская медицинская академия последипломного образования». Дизайн исследования – проспективное экспериментальное. В исследовании приняли участие 90 добровольцев с правосторонним ведущим кинематическим звеном в возрасте (данные представлены в виде медианы (Me), верхнего (UQ) и нижнего (LQ) квартилей – Me [UQ/LQ]) – 18,8 [16,8/20,8] лет. Соотношение мужчин и женщин составляло 5 : 4. Антропометрические параметры имели следующие показатели: рост – 171,8 [179,2/164,8] см, масса тела – 65,3 [76,6/58,5] кг.

Все участники исследования подписывали информированное согласие. Критериями исключения из исследования являлось превышение одного из нижеприведенных показателей нарушения скелетных функций, нарушений нейромышечных функций и нарушения сенсорных функций, связанных с болью, выше 8 %. Расчет показателей производился автоматически с применением разработанного ранее мобильного приложения (ссылка для просмотра и бесплатного скачивания программы: <https://getwoex.wixsite.com/checkin>) [16].

В ходе проведения исследования всем добровольцам проводился анализ АДК в виде батареи тестов, выполняемых в стандартизированных условиях средового окружения (рисунок) с применением технологии дистанционного захвата движений и реконструкции скелетной модели. Стандартизация, или средовая инвариативность, достигалась за счет ряда условий: 1) использование навигационного коврика, который имеет разметку, соответствующую заданию теста; 2) все за-

дания выполнялись в вертикальном положении; 3) испытуемые получали одинаковую вводную информацию о тестовом задании в виде видеоряда с образцом выполнения теста; 4) все испытуемые находились на расстоянии 1,5 м от монитора; 5) в качестве заданий использовалась диагностическая батарея, состоящая из 5 тестов.

Так, при выполнении теста фронтальной стабильности (ТФС) совершались перемещения нижних конечностей в сторону на разную длину, при выполнении теста сагиттальной стабильности (ТСС) – перемещения нижних конечностей вперед и назад. При выполнении теста пространственной ориентации (ТПО) перемещения стоп выполнялись на тот ориентир навигационного коврика, который подсвечивался красным цветом на экране монитора. При этом во время тестирования визуализируемое рабочее пространство монитора выполняло поворот по часовой и против часовой стрелки, что требовало принятия решения о месте постановки ноги на соответствующий маркер навигационного коврика. При выполнении теста идентификации стимула (ТИС) перемещения правой и левой стоп осуществлялись на тот ориентир навигационного коврика, который подсвечивался на экране монитора красным цветом. Другие маркеры навигационного коврика в произвольном режиме подсвечивались лиловым и синим цветами и являлись визуальными помехами. Выполнение теста шаговой локомоции (ТШЛ) было сопряжено с подъемом правой и левой нижних конечностей вверх на разную высоту.

В качестве диагностического инструмента (рисунок) применялся костюм TESLASUIT (производства Республіка Беларусь, УП «ВРТЭЖ») с интегрированными в него инерциальными сенсорами [11–14]. Во время тестовых заданий, в непрерывном режиме от инерциальных сенсоров костюма информация в виде кватернионов поступала в блок компьютерной обработки, где фиксировались пространственные координаты каждого сенсора. На основе полученных данных рассчитывались параметры времени активной фазы (ВАФ), средней угловой девиации (СУД) суставных звеньев пояса нижних конечностей, а также интегральные параметры инерциальной кинематики (ИК) нижних конечностей. При этом префиксом в скобках под цифрой 1 обозначалась принадлежность кинематического элемента к левой стороне, а 2 – к правой. В первых двух группах параметров после основного сокращения использовалось дополнительное в виде ТБС – тазобедренный сустав, КС – коленный сустав и ГС – голеностопный сустав. Во второй группе параметров конечным префиксом обозначалась принадлежность регистрируемого параметра к sg – сагиттальной плоскости (СГП), fr – фронтальной плоскости (ФРП) и hr – горизонтальной. Для инерциальных параметров использовались префиксы, характеризующие спектральный диапазон в Гц.

Статистическую обработку данных выполняли в пакете Statistics 8.0 (StatSoft, США). После оценки распределения полученных данных методом Шапиро–Уилка, для данных, соответствующих нормальному распределению, применяли параметрические методы анализа, для данных, не соответствующих нормальности, применяли непараметрические статистические методы. Критерием достоверности принималось значение $p \leq 0,05$.

Обработка массивов данных, получаемых от инерциальных датчиков, с последующей реконструкцией скелетной модели тела и расчетом показателей адаптивной кинематики осуществлялась в приложении «Python» (Python Software Foundation, США). Математическое моделирование скелетной модели выполнялось на основе программного продукта «OpenSim» (открытая платформа серии 4.1) с внесением собственных изменений и собственной процедурой каллибровки (частота дискретизации данных – 30 Гц).



Общий вид проводимого исследования: 1 – испытуемый в костюме «TESLASUIT»; 2 – тестовое задание; 3 – навигационный коврик

General nature of the present study: 1 – test person in “TESLASUIT”; 2 – test task; 3 – navigation pad

Результаты и их обсуждение. Полученные в ходе динамического тестирования результаты АДК представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Параметры адаптивной кинематики при выполнении постральных и динамических тестов
T a b l e 1. Parameters of adaptive kinematics when performing postural and dynamic tests

Параметр Parameter	ТФС			ТСС			ТПО			ТИС			ТШЛ		
	Me	LQ	UQ												
ВАФТБС(1)	4,4	3,5	8,2	19,2	18,1	22,7	13,1	12,5	15,7	11,1	10,4	13,2	19,0	17,8	22,4
ВАФТБС(2)	13,5	11,6	14,8	23,0	21,3	26,7	14,9	13,8	17,5	12,0	11,3	14,0	21,0	19,4	24,4
ВАФКС(1)	8,1	4,8	9,5	15,5	14,4	18,3	4,2	4,0	5,0	3,5	3,3	4,1	11,0	10,0	12,5
ВАФКС(2)	3,6	3,1	4,0	20,0	18,8	23,7	4,1	3,8	4,9	3,4	3,1	4,0	13,0	12,0	14,8
ВАФГС(1)	2,2	1,9	2,9	6,9	6,5	8,1	3,2	3,0	3,8	2,7	2,5	3,1	0,4	0,2	0,4
ВАФГС(2)	8,3	5,0	9,1	10,3	9,7	12,2	4,0	3,6	4,5	3,3	3,1	4,0	0,4	0,2	0,4
СУДТБС(1)sg	42,5	40,1	46,9	37,4	35,8	41,7	37,7	35,9	41,7	31,7	30,3	35,5	40,0	37,8	44,1
СУДТБС(1)fr	14,4	13,5	16,4	22,0	20,6	25,4	34,0	31,1	37,5	28,1	26,8	31,7	6,5	6,1	7,3
СУДТБС(1)hr	5,0	4,7	5,7	3,9	3,6	4,4	14,5	13,3	16,0	12,1	11,5	13,9	7,9	7,3	8,9
СУДТБС(2)sg	34,1	31,1	37,1	32,2	29,5	35,1	31,5	28,6	34,2	26,0	23,6	28,3	31,5	28,5	34,2
СУДТБС(2)fr	9,2	8,4	10,0	11,0	10,0	12,3	26,9	24,4	29,9	23,2	21,2	25,3	5,3	4,8	6,0
СУДТБС(2)hr	3,9	3,6	4,3	3,9	3,5	4,3	13,8	12,5	15,0	11,2	10,2	12,3	6,7	6,1	7,2
СУДКС(1)sg	7,7	7,0	8,5	22,8	20,8	24,8	22,2	20,2	24,2	18,5	16,8	20,2	26,4	24,0	28,7
СУДКС(2)sg	12,5	11,3	13,5	27,6	25,2	30,2	26,9	24,5	29,5	22,6	20,5	24,6	27,1	24,6	29,5
СУДГС(1)sg	5,9	5,3	6,3	10,8	9,8	11,7	11,0	10,0	11,9	8,9	8,1	9,7	7,7	7,0	8,3
СУДГС(2)sg	7,5	6,8	8,1	14,0	12,7	15,2	13,5	12,2	14,9	11,4	10,4	12,4	8,7	7,9	9,5
ИКБ(2)l-5	1,4	1,2	1,5	4,6	4,3	5,4	3,6	3,3	3,8	3,0	2,7	3,1	4,8	4,3	5,0
ИКБ(2)6-10	3,8	3,5	4,1	11,6	10,8	13,8	14,2	13,0	15,6	11,6	10,5	12,7	5,8	5,3	6,4
ИКБ(2)l1-15	4,7	4,3	5,1	17,0	15,7	19,8	18,7	17,0	20,9	16,0	14,5	17,4	8,0	7,3	8,6
ИКБ(1)l-5	1,0	0,9	1,0	3,7	3,4	4,2	3,5	3,2	4,0	2,9	2,6	3,2	4,9	4,4	5,3
ИКБ(1)6-10	2,8	2,5	3,0	10,5	10,0	12,4	14,3	13,0	15,9	12,2	11,1	13,4	6,3	5,8	7,0
ИКБ(1)l1-15	3,4	3,1	3,9	13,0	12,1	15,3	18,5	16,9	20,1	15,4	14,1	16,8	9,7	8,9	10,5
ИКГ(2)l-5	1,4	1,2	1,5	2,1	2,0	2,5	1,4	1,3	1,6	1,2	1,1	1,4	4,6	4,2	5,0
ИКГ(2)6-10	2,7	2,4	3,0	4,6	4,2	5,3	3,8	3,4	4,1	3,2	2,9	3,5	5,7	5,2	6,1
ИКГ(2)l1-15	4,0	3,7	4,3	6,5	6,0	7,7	6,2	5,6	6,9	5,3	4,8	5,9	7,9	7,1	8,7
ИКГ(1)l-5	1,4	1,2	1,5	1,4	1,3	1,7	0,7	0,7	0,8	0,6	0,6	0,7	4,9	4,4	5,3
ИКГ(1)6-10	3,3	3,0	3,7	3,4	3,1	4,0	2,2	2,0	2,4	1,7	1,6	2,0	6,3	5,7	7,0
ИКГ(1)l1-15	4,4	4,0	4,9	4,5	4,2	5,2	3,5	3,2	4,0	2,8	2,6	3,2	9,8	9,0	10,5
ИКС(2)l-5	1,1	1,0	1,2	6,0	5,5	7,0	1,1	1,0	1,2	0,9	0,8	1,0	4,4	4,0	4,9
ИКС(2)6-10	2,8	2,5	3,0	15,0	14,0	17,3	3,3	3,0	3,7	2,7	2,4	3,0	5,8	5,2	6,2
ИКС(2)l1-15	4,0	3,7	4,3	16,6	15,5	19,7	5,5	5,0	6,0	4,5	4,1	5,0	7,6	6,9	8,2
ИКС(1)l-5	0,8	0,7	0,9	5,5	5,0	6,3	1,0	0,9	1,0	0,8	0,8	1,0	4,5	4,0	5,0
ИКС(1)6-10	2,4	2,2	2,7	10,9	10,0	12,8	3,4	3,1	3,8	2,7	2,5	3,0	5,4	4,9	6,0
ИКС(1)l1-15	3,2	2,9	3,5	12,0	11,1	13,9	4,7	4,3	5,1	3,9	3,5	4,2	6,2	5,7	6,8

П р и м е ч а н и я: ТФС – тест фронтальной стабильности; ТСС – тест сагиттальной стабильности; ТПО – тест пространственной ориентации; ТИС – тест идентификации стимула; ТШЛ – тест шаговой локомоции; ВАФ – время активной фазы; СУД – средняя угловая девиация; ИК – инерциальная кинематика; (1) – принадлежность кинематического элемента к левой стороне; (2) – принадлежность кинематического элемента к правой стороне; ТБС – тазобедренный сустав; КС – коленный сустав; ГС – голеностопный сустав; sg – сагиттальная плоскость; fr – фронтальная плоскость; hr – горизонтальная плоскость.

N o t e s: ТФС – frontal stability test; ТСС – sagittal stability test; ТПО – spatial orientation test; ТИС – stimulus identification test; ТШЛ – stepping locomotion test; ВАФ – time of the active phase; СУД – average angular deviation; ИК – inertial kinematics; (1) – belonging of the kinematic element to the left side; (2) – belonging of the kinematic element to the right side; ТБС – hip joint; КС – knee joint; ГС – ankle joint; sg – sagittal plane; fr – frontal plane; hr – horizontal plane.

При статистической обработке полученных данных установлено, что параметры АДК имеют ненормальное распределение. При оценке перспективной зависимости параметров АДК от антропометрических данных и возрастного фактора методом множественной нелинейной регрессии и методом ANOVA (MANOVA), а также методом корреляционного анализа установлен ряд ста-

тистических закономерностей, согласно которым были выделены параметры АДК с отсутствующими перспективными связями с антропометрическими данными, а именно: ВАФТБС и ВАФКС – при выполнении ТФС; СУДТБС, СУДКС, СУДГС в СГП – при выполнении ТФС, ТСС, ТПО и ТШЛ; СУДКС и СУДГС в СГП – при выполнении ТИС; СУДТБС во ФРП – при выполнении ТИС; ИКБ, ИКГ, ИКС – при выполнении ТФС, ТПО, ТИС и ТШЛ.

В ходе исследования выделенные параметры подвергались обработке методом дисперсионного анализа. В результате установлены статистически значимые связи, отражающие специфику АДК пространственных перемещений тела во ФРП в виде обратнопропорциональной зависимости суставной активности левых ТБС и КС, а также прямопропорциональной зависимости правого ТБС и обоих КС. Специфика АДК при фронтальных перемещениях тела определяется пропорциональной угловой подвижностью в СГП крупных суставов правой ноги и КС и ГС левой, а также активацией инерциальной кинематики всех элементов пояса нижних конечностей.

В ходе исследования установлены закономерности АДК нижних конечностей при пространственных перемещениях тела в СГП, которые определяются наличием прямопропорциональной угловой подвижности в СГП крупных суставов правой ноги и КС и ГС левой. Данный паттерн идентичен с паттерном перемещений во ФРП.

В ходе исследования установлены закономерности АДК нижних конечностей при произвольных перемещениях тела в условиях пространственной неопределенности в виде пропорциональной угловой подвижности крупных суставов правой ноги и КС и ГС левой в СГП, а также активации инерциальной кинематики всех элементов локомоторной системы нижних конечностей.

В качестве одной из закономерностей АДК при произвольных перемещениях тела в условиях идентификации визуального стимула выявлена двухсторонняя пропорциональная активация угловой подвижности ТБС во ФРП, а также КС и ГС в СГП, а при шаговой локомоции имела место пропорциональная угловая активация суставной подвижности всех крупных суставов правой ноги и КС и ГС левой в СГП с вариативной активацией инерциальной кинематики всех элементов локомоторной системы нижних конечностей.

Далее параметры АДК, отражающие специфику выполнения динамических тестов, после проведения корреляционного анализа были сгруппированы продемонстрированным в табл. 2 образом, где релевантные показатели (показатели специфичные для теста) обозначены «+».

Т а б л и ц а 2. Параметры адаптивной кинематики, релевантные для проведения оценки качества выполнения поструральных и динамических тестов

Table 2. Parameters of adaptive kinematics relevant for assessing the quality of performance of postural and dynamic tests

Параметр Parameter	ТФС	ТСС	ТПО	ТИС	ТШЛ
ВАФТБС(1)	+				
ВАФТБС(2)	+				
ВАФКС(1)	+				
ВАФКС(2)	+				
ВАФГС(1)					
ВАФГС(2)					
СУДТБС(1)sg		+			
СУДТБС(1)fr				+	
СУДТБС(1)hr					
СУДТБС(2)sg		+			
СУДТБС(2)fr				+	
СУДТБС(2)hr					
СУДКС(1)sg		+		+	
СУДКС(2)sg		+		+	
СУДГС(1)sg		+		+	
СУДГС(2)sg		+		+	
ИКБ(2)1-5			+		

Окончание табл. 2

Параметр Parameter	ТФС	ТСС	ТПО	ТИС	ТШЛ
ИКБ(2)6-10			+		
ИКБ(2)11-15			+		
ИКБ(1)1-5			+		
ИКБ(1)6-10			+		
ИКБ(1)11-15			+		
ИКГ(2)1-5			+		
ИКГ(2)6-10			+		
ИКГ(2)11-15			+		
ИКГ(1)1-5			+		
ИКГ(1)6-10			+		
ИКГ(1)11-15			+		
ИКС(2)1-5			+		
ИКС(2)6-10			+		
ИКС(2)11-15			+		
ИКС(1)1-5			+		
ИКС(1)6-10			+		
ИКС(1)11-15			+		

Примечание. Сокращения как в табл. 1.
Note. Abbreviations as in Table 1.

В результате проведенного анализа из 170 параметров АДК были выделены 34 релевантных маркера (специфичных для определенных перемещений тела в пространстве и не зависящих от антропометрических и возрастных неопределенностей). При этом группа показателей ВАФ является специфичной для ТСС, а группа показателей СУД – для ТСС и ТИС. Также установлено, что инерциальные показатели АДК являются специфичными для ТПО, в то время как применение ТШЛ можно считать нецелесообразным в виду высоких корреляционных связей показателей АДК со всеми остальными тестами, что определяется спецификой их выполнения, связанной с подъемами нижних конечностей вверх.

Таким образом, в ходе проведенного исследования разработан метод объективной оценки двигательных приспособительных реакций здоровых лиц, который заключается в проведении биомеханического анализа сложных специфических движений, регламентированных стандартизированными условиями средового окружения с визуальной биологической обратной связью по открытому контуру и последовательным выполнением статистически значимых ($p < 0,001$) в отношении биомеханической информативности четырех разноплановых кинематических тестов ТФС, ТСС, ТПО и ТИС. Разработанная аналитическая модель основана на математическом вычислении пространственно-временных переменных АДК, сгруппированных по признаку статистической значимости ($p < 0,001$) и устойчивости к антропометрическим и возрастным неопределенностям, в четыре критериальные группы для каждого двигательного теста.

Параметры первой группы статистически валидны ($p < 0,001$) при реализации ТФС и представлены для левой/правой сторон: ВАФ ТБС 4,4[8,2/3,5] / 13,5[14,8/11,6] с ($p > 0,1$) и КС 8,1[9,5/4,8] / 3,6[4,0/3,1] с ($p > 0,2$). Данный параметр рассчитывается как момент пространственных перемещений указанных кинематических элементов с линейной скоростью более 0,5 м/с.

Вторая группа критериев статистически значимо ($p < 0,001$) связана с СУД – средним значением изменения угловой амплитуды, за время проведения ТСС, в ТБС 37,4[41,7/35,8] / 32,2[35,1/29,5]° ($p > 0,01$), КС 22,8[24,8/20,8] / 27,6[30,2/25,2]° ($p > 0,08$) и ГС 10,8[11,7/9,8] / 14,0[15,2/12,7]° ($p > 0,08$).

Также СУД отражает особенности выполнения ТИС ($p < 0,001$), формируя при этом третью группу переменных угловой кинематики КС 18,5[20,2/16,8] / 22,6 [24,6/20,5]° ($p > 0,2$), ГС 8,9[9,7/8,1] / 11,4[12,4/10,4]° ($p > 0,2$) и ТБС 28,1[31,7/26,8] / 23,2[25,3/21,2]° ($p > 0,3$) во фронтальной плоскости.

Показатели ИК в спектральных полосах 1–5, 6–10 и 11–15 Гц соответственно для бедер 3,5[4,0/3,2], 14,3[15,9/13], 18,5[20,1/16,9] / 3,6[3,8/3,3], 14,2[15,6/13], 18,7[20,9/17] рад/с² ($p > 0,06$); го-

леней $0,7[0,8/0,7]$, $2,2[2,4/2]$, $3,5[4,0/3,2]$ / $1,4[1,6/1,3]$, $3,8[4,1/3,4]$, $6,2[6,9/5,6]$ рад/с² ($p > 0,06$) и стоп $1[1/0,9]$, $3,4[3,8/3,1]$, $4,7[5,1/4,3]$ / $1,1[1,2/1]$, $3,3[3,7/3]$, $5,5[6/5]$ рад/с² ($p > 0,08$) являются производными, полученными при спектральном анализе Фурье, и объективно отражают состояние адаптивной кинематики специфичной ($p < 0,001$) для теста «пространственной ориентации».

Разработанная диагностическая модель демонстрирует отличное качество (AUC = 0,94) при выявлении нарушений адаптивной кинематики в однородной группе здоровых лиц ($p < 0,001$).

Заключение. В ходе проведения исследования разработан новый метод анализа двигательных приспособительных реакций человека, основанный на вычислении специфических маркеров времени активной фазы средней угловой девиации и инерциальной кинематики при выполнении стандартизированных кинематических тестов «фронтальная стабильность», «сагиттальная стабильность», «пространственная ориентация» и «идентификация стимула». Установлено, что специфическими ($p < 0,001$) маркерами первого теста являются показатели времени активной фазы, маркеры второго и четвертого тестов связаны с параметрами средней угловой девиации, специфическими индикаторами третьего теста может выступать инерциальная кинематика бедер, голени и стоп.

Список использованных источников

1. Valid and reliable instruments for arm-hand assessment at ICF activity level in persons with hemiplegia: a systematic review / R. Lemmens [et al.] // *BMC Neurol.* – 2012. – Vol. 12, N 1. – Art. 21. <https://doi.org/10.1186/1471-2377-12-21>
2. Долгосрочные исходы мозгового инсульта в крупной городской популяции Беларуси / С. Д. Кулеш [и др.] // *Вестн. ВГМУ.* – 2011. – Т. 10, № 3. – С. 93–101.
3. Katan, M. Global Burden of Stroke / M. Katan, A. Luft // *Semin. Neurol.* – 2018. – Vol. 38, N 2. – P. 208–211. <https://doi.org/10.1055/s-0038-1649503>
4. Performance-based everyday functioning after stroke: relationship with IADL questionnaire and neurocognitive performance / J. R. Sadek [et al.] // *J. Int. Neuropsychol. Soc.* – 2011. – Vol. 17, N 5. – P. 832–840. <https://doi.org/10.1017/s1355617711000841>
5. Bertrand, A. M. Differences in the magnitude and direction of forces during a submaximal matching task in hemiparetic subjects / A. M. Bertrand, D. Bourbonnais, C. Mercier // *Exp. Brain. Res.* – 2004. – 157, N 1. – P. 32–42. <https://doi.org/10.1007/s00221-003-1813-x>
6. Abnormal muscle coactivation patterns during isometric torque generation at the elbow and shoulder in hemiparetic subjects / J. P. Dewald [et al.] // *Brain.* – 1995. – Vol. 118. – P. 495–510.
7. Dewald, J. P. Abnormal joint torque patterns in the paretic upper limb of subjects with hemiparesis / J. P. Dewald, R. F. Beer // *Muscle Nerve.* – 2001. – Vol. 24, N 2. – P. 273–283. [https://doi.org/10.1002/1097-4598\(200102\)24:2%3C273::aid-mus130%3E3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/1097-4598(200102)24:2%3C273::aid-mus130%3E3.0.co;2-z)
8. Gladstone, D. J. The Fugl-Meyer assessment of motor recovery after stroke: a critical review of its measurement properties / D. J. Gladstone, C. J. Danells, S. E. Black // *Neurorehabil. Neural. Repair.* – 2002. – Vol. 16, N 3. – P. 232–240. <https://doi.org/10.1177/154596802401105171>
9. Bilateral assessment of functional tasks for robot-assisted therapy applications / M. J. Johnson [et al.] // *Med. Biol. Eng. Comput.* – 2011. – Vol. 49, N 10. – P. 1157–1171. <https://doi.org/10.1007/s11517-011-0817-0>
10. Test-retest reliability of robotic assessment measures for the evaluation of upper limb recovery / R. Colombo [et al.] // *Neural. Syst. Rehabil. Eng.* – 2014. – Vol. 22, N 5. – P. 1020–1029. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2014.2306571>
11. Stroke survivors control the temporal structure of variability during reaching in dynamic environments / M. Mukherjee [et al.] // *Ann. Biomed. Eng.* – 2013. – Vol. 41, N 2. – P. 366–376. <https://doi.org/10.1007/s10439-012-0670-9>
12. Феноменология инерциальной кинематики в структуре формирования двигательных адаптаций / В. А. Лукашевич [и др.] // *Докл. БГУИР.* – 2020. – Т. 18, № 5. – С. 62–70. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-62-70>
13. Новые возможности количественной оценки качественной структуры адаптивной кинематики / В. А. Лукашевич [и др.] // *Мед. журн.* – 2020. – № 4. – С. 69–77.
14. Lukashevich, V. A. Classification of motor impairments after stroke in consequence of adaptive kinematic specificity / V. A. Lukashevich, V. V. Ponomarev // *Intern. Neurol. J.* – 2020. – Vol. 16, N 5. – P. 40–47. <https://doi.org/10.22141/2224-0713.16.5.2020.209251>
15. Метод оценки адаптивной кинематики в эксперименте постурального тестирования / В. А. Лукашевич [и др.] // *Новости мед.-биол. наук.* – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 6–15.
16. Лукашевич, В. А. Опыт применения мобильного приложения для оценки состояния опорно-двигательного аппарата / В. А. Лукашевич, Т. А. Морозевич-Шилюк, Г. Г. Лесив // *Мир спорта.* – 2021. – № 2 (83). – С. 122–128.

References

1. Lemmens R. J. M., Timmermans A. A. A., Janssen-Potten Y. J. M., Smeets R. J. E. M., Seelen H. A. M. Valid and reliable instruments for arm-hand assessment at ICF activity level in persons with hemiplegia: a systematic review. *BMC Neurology*, 2012, vol. 12, no. 1, art. 21. <https://doi.org/10.1186/1471-2377-12-21>

2. Kulesh S. D., Filina N. A., Kostinevich T. M., Kletsikova L. A., Savchenko M. E. Long-term outcomes of cerebral insult in the large urban population of Belarus. *Vestnik Vitebskogo Gosudarstvennogo Meditsinskogo Universiteta = Vitebsk Medical Journal*, 2011, vol. 10, no. 3, pp. 93–101 (in Russian).
3. Katan M., Luft A. Global Burden of Stroke. *Seminars in Neurology*, 2018, vol. 38, no. 2, pp. 208–211. <https://doi.org/10.1055/s-0038-1649503>
4. Sadek J. R., Stricker N., Adair J. C., Haaland K. Y. Performance-based everyday functioning after stroke: relationship with IADL questionnaire and neurocognitive performance. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 2011, vol. 17, no. 5, pp. 832–840. <https://doi.org/10.1017/s1355617711000841>
5. Bertrand A. M., Bourbonnais D., Mercier C. Differences in the magnitude and direction of forces during a submaximal matching task in hemiparetic subjects. *Experimental Brain Research*, 2004, vol. 157, no. 1, pp. 32–42. <https://doi.org/10.1007/s00221-003-1813-x>
6. Dewald J. P., Pope P. S., Given J. D., Buchanan T. S., Rymer W. Z. Abnormal muscle coactivation patterns during isometric torque generation at the elbow and shoulder in hemiparetic subjects. *Brain*, 1995, vol. 118, no. 2, pp. 495–510.
7. Dewald J. P., Beer R. F. Abnormal joint torque patterns in the paretic upper limb of subjects with hemiparesis. *Muscle and Nerve*, 2001, vol. 24, no. 2, pp. 273–283. [https://doi.org/10.1002/1097-4598\(200102\)24:2%3C273::aid-mus130%3E3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/1097-4598(200102)24:2%3C273::aid-mus130%3E3.0.co;2-z)
8. Gladstone D. J., Danells C. J., Black S. E. The Fugl-Meyer assessment of motor recovery after stroke: a critical review of its measurement properties. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 2002, vol. 16, no. 3, pp. 232–240. <https://doi.org/10.1177/154596802401105171>
9. Johnson M. J., Wang S., Bai P., Strachota E., Tchekanov G., Melbye J., McGuire J. Bilateral assessment of functional tasks for robot-assisted therapy applications. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 2011, vol. 49, no. 10, pp. 1157–1171. <https://doi.org/10.1007/s11517-011-0817-0>
10. Colombo R., Cusmano I., Sterpi I., Mazzone A., Delconte C., Pisano F. Test-retest reliability of robotic assessment measures for the evaluation of upper limb recovery. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2014, vol. 22, no. 5, pp. 1020–1029. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2014.2306571>
11. Mukherjee M., Koutakis P., Siu K. C., Fayad P. B., Stergiou N. Stroke survivors control the temporal structure of variability during reaching in dynamic environments. *Annals of Biomedical Engineering*, 2013, vol. 41, no. 2, pp. 366–376. <https://doi.org/10.1007/s10439-012-0670-9>
12. Lukashevich U. A., Ponomarev U. U., Mitskevich U. E., Gubkin S. V., Gavrilovich Y. A., Zhurko E. A., Kipel A. N. The phenomenology of inertial kinematics in the structure of forming motor adaptations. *Doklady BGUIR*, 2020, vol. 18, no. 5, pp. 62–70 (in Russian). <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-62-70>
13. Lukashevich U. A., Ponomarev V. V., Gubkin S. V., Mitskevich U. Y., Osipov A. N. New opportunities for quantitative assessment of the qualitative structure of adaptive kinematics. *Meditsinskii zhurnal = Medical Journal*, 2020, no. 4, pp. 69–77 (in Russian).
14. Lukashevich V. A., Ponomarev V. V. Classification of motor impairments after stroke in consequence of adaptive kinematic specificity. *International Neurological Journal*, 2020, vol. 16, no. 5, pp. 40–47. <https://doi.org/10.22141/2224-0713.16.5.2020.209251>
15. Lukashevich V. A., Ponomarev V. V., Gubkin S. V., Mitskevich V. E. A method for assessing adaptive kinematics in a postural testing experiment. *Novosti mediko-biologicheskikh nauk = News of Biomedical Sciences*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 6–15 (in Russian).
16. Lukashevich V. A., Morozevich-Shilyuk T. A., Lesiv G. G. Experience in using mobile application for musculoskeletal state assessment. *Mir sporta [World of Sports]*, 2021, no. 2(83), pp. 122–128 (in Russian).

Информация об авторах

Лукашевич Владислав Анатольевич – канд. мед. наук, докторант. Белорусская медицинская академия последипломного образования (ул. П. Бровки, 3, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: u.lukashevich@gmail.com.

Пономарев Владимир Владимирович – д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой. Белорусская медицинская академия последипломного образования (ул. П. Бровки, 3, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: neurology@belmapo.by.

Губкин Сергей Владимирович – член-корреспондент, д-р мед. наук, профессор, директор. Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: goubkin@yandex.ru.

Манкевич Светлана Михайловна – канд. мед. наук, доцент. Белорусская медицинская академия последипломного образования (ул. П. Бровки, 3, 220013, Минск, Республика Беларусь).

Information about the authors

Lukashevich Vladislav A. – Ph. D. (Medicine), Doctoral Student. Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education (3, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: u.lukashevich@gmail.com.

Ponomarev Vladimir V. – D. Sc. (Medicine), Professor, Head of the Department. Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education (3, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: neurology@belmapo.by.

Gubkin Sergey V. – Corresponding Member, D. Sc. (Medicine), Professor, Director. Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: goubkin@yandex.ru.

Mankevich Svetlana M. – Ph. D. (Medicine), Associate Professor. Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education (3, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus).

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

УДК 577/112/853^616/36-006/6-074
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-59-65>

Поступило в редакцию 16.06.2022
Received 16.06.2022

О. Е. Кузнецов^{1,2}, В. М. Цыркунов², С. Ш. Керимова³

¹Институт биохимии биологически активных соединений Национальной академии наук Беларуси,
Гродно, Республика Беларусь

²Гродненский государственный медицинский университет, Гродно, Республика Беларусь

³Гродненское областное клиническое патологоанатомическое бюро, Гродно, Республика Беларусь

ЭКСПРЕССИЯ МУЦИНОВ ПРИ РАКЕ ПЕЧЕНИ

(Представлено членом-корреспондентом С. В. Губкиным)

Аннотация. Рост заболеваемости, трудности ранней диагностики и высокий уровень летальности пациентов при раке печени (РП) определяют актуальность изучения механизмов его развития. Оценена экспрессия высокомолекулярных гликопротеинов MUC-1, MUC-13 при РП. Предметом исследования были 65 архивных образцов тканей опухоли печени и 34 пробы сыворотки крови у пациентов с морфологически подтвержденным РП. Возраст обследуемых составил 26–97 лет. Исследование уровня антител к MUC-1 и MUC-13 проводили методом ИФА. Установлены пределы референтных значений MUC-1 ($0,250 \pm 0,10$ нг/мл) и MUC-13 ($0,321 \pm 0,13$ нг/мл) в сыворотке крови у здоровых лиц. Концентрация сывороточных антител к MUC-1 и MUC-13 у пациентов с РП была значимо выше показателей здоровых лиц. Содержание MUC-1 и MUC-13 в ткани опухоли печени было более высоким, чем в сыворотке крови практически здоровых лиц и пациентов с РП. При подтвержденном диагнозе РП уровень антител к MUC-1, превышающий в сыворотке крови $0,373$ нг/мл, и уровень антител к MUC-13 более $0,939$ нг/мл может указывать на высокий риск наличия опухолевого процесса.

Ключевые слова: муцин, сыворотка, ткань, рак, печень

Для цитирования. Кузнецов, О. Е. Экспрессия муцинов при раке печени / О. Е. Кузнецов, В. М. Цыркунов, С. Ш. Керимова // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 1. – С. 59–65. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-59-65>

Oleg E. Kuznetsov^{1,2}, Vladimir M. Tsyrcunov², Sapartach Sh. Kerimova³

¹Institute of Biochemistry of Biologically Active Compounds of the National Academy of Sciences of Belarus, Grodno, Republic of Belarus

²Grodno State Medical University, Grodno, Republic of Belarus

³Grodno Regional Clinical Pathoanatomical Bureau, Grodno, Republic of Belarus

MUCIN EXPRESSION IN LIVER CANCER

(Communicated by Corresponding Member Sergey V. Goubkin)

Abstract. Increasing incidence, difficulties in early diagnosis, and a high mortality rate in liver cancer (LC) determine the relevance of studying the mechanisms of its development. The aim of the work is to evaluate the expression of high molecular weight glycoproteins MUC-1, MUC-13 in liver cancer. The object of study is LC tissue samples of 65 patients from the archives and 34 blood serum samples from patients with morphologically confirmed LC. The age of subjects was 26–97 years. The level of antibodies to MUC-1 and MUC-13 was studied by ELISA. The reference value ranges of MUC-1 (0.250 ± 0.10 ng/ml) and MUC-13 (0.321 ± 0.13 ng/ml) in the blood serum of healthy individuals were established. The concentration of antibodies to MUC-1 and MUC-13 in the blood serum in RP was significantly higher than that in practically healthy individuals. The concentration of MUC-1 and MUC-13 in the LC tumor tissue was higher than that in the blood serum of apparently healthy individuals and LC patients. With a confirmed LC diagnosis, the level of antibodies to MUC-1 in the blood serum, which exceeds 0.373 ng/ml, and the level of antibodies to MUC-13, which is more than 0.939 ng/ml, may indicate a high risk of a tumor process.

Keywords: mucin, serum, tissue, cancer, liver

For citation. Kuznetsov O. E., Tsyrcunov V. M., Kerimova S. Sh. Mucin expression in liver cancer. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 1, pp. 59–65 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-59-65>

Введение. Трудности диагностики онкологических процессов, их медицинская, социальная и экономическая значимость и высокий уровень летальности определяют актуальность борьбы с ними и делают проблему ранней диагностики одной из ключевых [1; 2]. В 2020 г. раком печени (РП) в мире заболели 905 677 человек, умерли 830 180 пациентов. Частота его увеличивается по мере старения населения, достигая пика около 70 лет [3; 4]. Наша страна относится к странам с невысоким уровнем заболеваемости РП, однако около 35 % случаев РП диагностируется на III и IV стадиях, а 5-летняя выживаемость варьирует от 60,6 до 14,5 % [5].

В настоящее время среди биологических маркеров опухолевого роста значительный интерес к себе проявили высокомолекулярные гликопротеины, муцины (MUC) [6]. В норме в организме человека MUC экспрессируются клетками однослойного эпителия и входят в состав молекулярной системы, способствующей устойчивости эпителиального барьера при поражении. У человека идентифицирован 21 ген MUC, среди которых 15 экспрессируются в различных областях желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) [7; 8].

На основании структуры, функции и клеточной локализации MUC делятся на мембранные и секретируемые [9]. Секретируемые MUC, включающие MUC2, MUC5AC, MUC5B, MUC6, MUC7, создают непроницаемый гель, образующий барьер, «задерживающий» микроорганизмы и вирусы [10].

В системе ЖКТ мембранные MUC представлены: MUC1, MUC3A, MUC3B, MUC4, MUC12, MUC13, MUC15, MUC16, MUC17 [8]. MUC1 («полиморфный») в основном присутствует в желудке и эпителии поджелудочной железы; MUC3 можно обнаружить в кишечнике; MUC4 («трахеобронхиальный») – в полости рта и кишечнике [11]. Известны общие механизмы трансмембранного действия MUC, особенно MUC1 (CA 15-3 или CD227), MUC4 и MUC16 (CA125), а также их роль в онкогенезе и метастазировании [6].

В злокачественных опухолях можно обнаружить повышенную экспрессию MUC, изменение их внутриклеточной локализации и увеличение гипогликозилированных форм, представляющих идеальную мишень для таргетной терапии [12]. Сверхэкспрессия MUC и их аномальная внутриклеточная локализация могут способствовать увеличению инвазивного и метастатического потенциала злокачественных клеток [13]. Было распространено мнение, что гепатоцеллюлярный рак (ГЦР) не продуцирует MUC, тогда как холангиокарцинома (ХЦ) или комбинированный ГЦР-ХЦ может продуцировать их. Однако уже доказано, что MUC могут продуцироваться клетками ГЦР, которые не проявляют или еще не подверглись морфологической дифференцировке в билиарные фенотипы [6]. Многие считают, что экспрессия и локализация белков MUC1 в первичных карциномах печени (PLC) полезны в дифференциальной диагностике и прогнозе течения [14].

В первом исследовании, демонстрирующем значение MUC13 в качестве биомаркера при различных карциномах, было показано, что уровни MUC13 в сыворотке человека были значительно повышены у пациентов с РП и другими видами рака, в отличие от воспалительных заболеваний кишечника [15].

Таким образом, MUC, как объект исследования, представляют интерес для понимания биологии злокачественных новообразований и предшествующих их развитию фоновых процессов, а также для совершенствования методов диагностики и прогноза при онкологических заболеваниях.

Цель исследования – провести анализ экспрессии высокомолекулярных гликопротеинов MUC-1, MUC-13 при опухолевых процессах в печени для ранней диагностики и мониторинга прогрессирования.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования были образцы тканей рака печени 65 пациентов из архива Гродненского областного клинического патологоанатомического бюро и 34 образца сыворотки крови, полученных при обращении пациентов за консультативной и медицинской помощью. Исследование выполнено в рамках обязательного медицинского обследования в соответствии с действующими протоколами диагностики и лечения.

Злокачественная природа поражения печени доказана морфологическими исследованиями и представлена следующими вариантами РП: гепатоцеллюлярный рак (ГЦР), холангиокарцинома

(ХЦ). Возраст обследуемых на момент постановки диагноза составил 26–97 лет; медиана возраста (Me) – $62,6 \pm 14,6$ лет, нижний квартиль (Q25) – 53 года, верхний квартиль (Q75) – 73 года.

Среди обследуемых лиц было 44 мужчины (67,7 %) и 21 женщина (32,3 %). ГЦР печени установлена в 52 случаях (80 %); ХЦ – 13 (20 %). Среди обследуемых у 17 (26,1 %) пациентов РП диагностирован на фоне цирроза печени (ЦП): 13 – мужчин, 4 – женщины. У 21 пациента (32,3 %) отмечены отдаленные метастазы в легкое, лимфатические узлы, надпочечники, брюшину, позвоночник.

Группу контрольных исследований представляли образцы крови 34 здоровых лиц, полученные в рамках профилактических исследований, средний возраст пациентов составил $58,8 \pm 7,7$ года (минимум 45 лет, максимум 81 год), 19 мужчин (55,9 %), 15 женщин (44,1 %).

Исследование уровня антител к MUC-1 и MUC-13 (нг/мл) проводили методом ИФА на анализаторе Mindray 96RA (Китай) в образцах ткани и сыворотки крови пациентов при помощи набора реагентов производства Wuhan Fine Biological Technology Co. Ltd (Китай).

Из образцов ткани в парафине готовили серийные срезы. В соответствии со стандартным протоколом проводили пробоподготовку образцов ткани к исследованию набором реагентов производства MagneSil Genomic, Fixed System (Promega, США).

Образцы сыворотки крови получали стандартным способом с использованием вакуумных систем Vacuette с активатором свертывания производства Greiner Bio-One (Австрия). Подготовка проб крови для исследования проводилась унифицированным способом: центрифугирование (центрифуга Fepox-24M, Китай) при 3000g в течение 10 мин.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием стандартного пакета прикладных статистических программ SPSS. Различие между изучаемыми параметрами признавали достоверным при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. Установленные в сыворотке крови концентрации антител к рецепторам MUC-1 и MUC-13 у здоровых лиц, а также в образцах крови и ткани опухоли у пациентов с РП представлены на рис. 1.

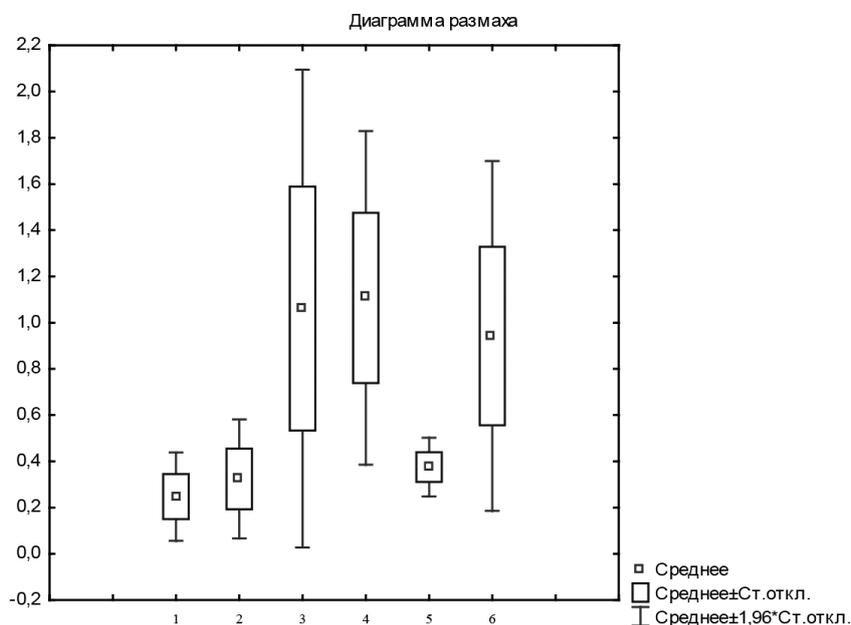


Рис. 1. Концентрация уровня антител к MUC-1 и MUC-13 в экстракте ткани опухоли, в сыворотке здоровых лиц и пациентов с РП, ось абсцисс: 1 – MUC-1, сыворотка здоровых лиц; 2 – MUC-13, сыворотка здоровых лиц; 3 – MUC-1, ткань опухоли печени; 4 – MUC-13, ткань опухоли печени; 5 – MUC-1, сыворотка пациентов с РП; 6 – MUC-13, сыворотка пациентов с РП; ось ординат – концентрация MUC в нг/мл

Fig. 1. The concentration of the level of antibodies to MUC-1 and MUC-13 in the tumor tissue extract, in the serum of healthy individuals and patients with CL, abscissa: 1 – MUC-1, serum of healthy individuals; 2 – MUC-13, serum of healthy individuals; 3 – MUC-1, liver tumor tissue; 4 – MUC-13, liver tumor tissue; 5 – MUC-1, serum of patients with CL; 6 – MUC-13, serum of patients with CL; y-axis – MUC concentration in ng/ml

У здоровых лиц концентрация антител к рецептору MUC-1 составила $0,250 \pm 0,10$ нг/мл, рецептору MUC-13 – $0,321 \pm 0,13$ нг/мл, что соответствовало ранее полученным нами показателям в других возрастных группах. Концентрация антител к MUC-1 и MUC-13 в сыворотке крови пациентов с РП имела достоверные отличия от контрольных цифр: $0,381 \pm 0,06$ нг/мл ($p = 0,002$) и $0,940 \pm 0,39$ нг/мл ($p = 0,0001$) соответственно. Среднее значение концентраций антител к MUC-1 и MUC-13 в экстракте ткани опухоли печени было достоверно выше, чем в сыворотке крови здоровых лиц и пациентов с РП.

Использование теста Вилкоксона позволило получить значения Z -теста и предположить, что значимая концентрация уровня антител к MUC-1 и MUC-13 в ткани опухоли, вероятно, связана с устойчивостью к апоптозу при РП, что требует подтверждения в дополнительных исследованиях:

MUC-1 (здоровые, сыворотка) и MUC-1 (ткань опухоли): $Z = 4,843025$, $p = 0,000001$;

MUC-13 (здоровые, сыворотка) и MUC-13 (ткань опухоли): $Z = 4,831024$, $p = 0,000001$;

MUC-1 (РП, сыворотка) и MUC-1 (ткань опухоли): $Z = 4,674735$, $p = 0,000003$;

MUC-13 (РП, сыворотка) и MUC-13 (ткань опухоли): $Z = 2,374765$, $p = 0,017561$.

Анализ зависимости уровня экспрессии MUC-1 и MUC-13 в опухолевой ткани с возрастом пациентов представлен на рис. 2.

Как видно из рис. 2, достоверных корреляционных связей между уровнем антител к MUC-1 и MUC-13 в экстракте ткани печени, пораженной опухолью, и возрастом пациентов не установлено (Spearman, Median Test, Mann–Whitney U -test): MUC-1 – $R = 0,053076$, $p = 0,772962$; MUC-13 – $R = 0,190647$, $p = 0,295940$). Таким образом, уровень антител не зависит от возраста, что повышает его значимость как биологического маркера.

Распределение концентраций (переменных) антител к MUC-1 и MUC-13 в экстракте ткани при РП внутри возрастных групп (Q25 – 53 года, Q75 – 73 года) позволило оценить их концентрации с минимальным размахом (интервалом изменения) переменной: интервал изменения концентрации, на которую не влияет возрастной выброс, аномальное значение (рис. 3).

С учетом размаха переменной экспрессии MUC-1 и MUC-13 в возрастных группах лиц с диагнозом РП в возрастной группе 53 и 73 года проведена оценка множественной регрессии переменных MUC-1 и MUC-13 и предсказанное значение концентрации MUC-1 и MUC-13 для лиц с РП (рис. 4).

Как показал статистический анализ, предсказанное значение концентрации антител к MUC-1 и MUC-13 в ткани при РП составило: MUC-1 в 53 года – 1,119 нг/мл, MUC-1 в 73 года – 1,046 нг/мл, MUC-13 в 53 года – 1,089 нг/мл, MUC-13 в 73 года – 1,157 нг/мл.

Значение концентрации антител к MUC-1 и MUC-13 в сыворотке крови при РП составило: MUC-1 в 53 года – 0,373 нг/мл, MUC-1 в 73 года – 0,380 нг/мл, MUC-13 в 53 года – 0,939 нг/мл, MUC-13 в 73 года – 0,950 нг/мл. Показатели предсказанного значения MUC соответствовали

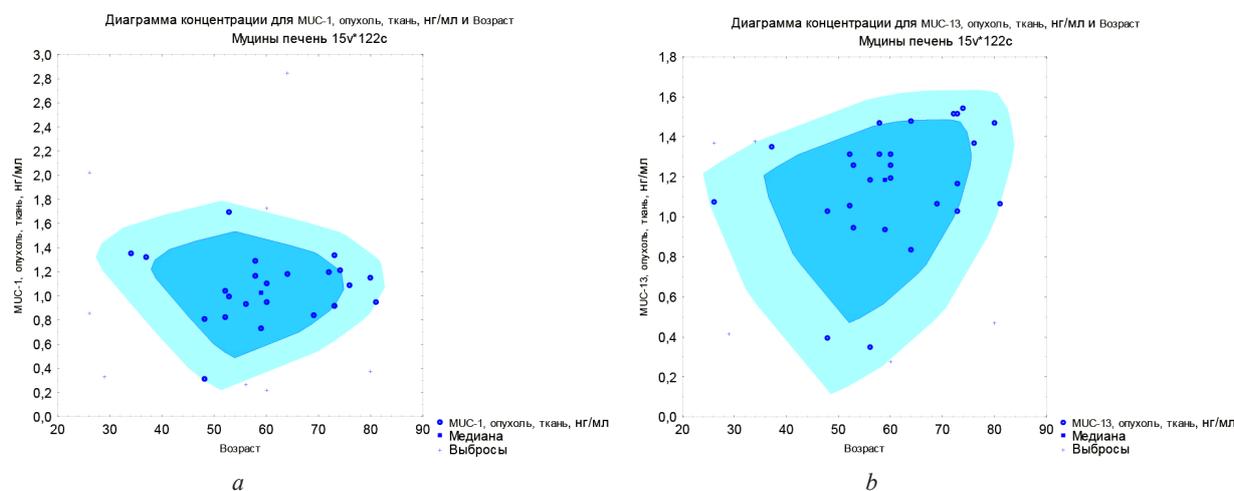


Рис. 2. Зависимость концентрации уровня антител к MUC-1 (a) и MUC-13 (b) от возраста пациента

Fig. 2. Dependence of the concentration of the level of antibodies to MUC-1 (a) and MUC-13 (b) on the age of the patient

концентрациям данных показателей в образцах MUC пациентов с установленным РП и достоверно не отличались: MUC-1 (53, 73 года) – $p = 0,63$; MUC-13 (53, 73 года) – $p = 0,896$.

Связи между уровнем антител MUC-1 и MUC-13 в ткани и гендерной принадлежностью пациентов с РП не выявлено ($p > 0,05$, Mann–Whitney U -test).

Поскольку содержание антител MUC-1 и MUC-13 в ткани не коррелировало с полом и возрастом пациентов, определение MUC-1 и MUC-13 в ткани целесообразно проводить у пациентов при любой форме РП независимо от пола и возраста.

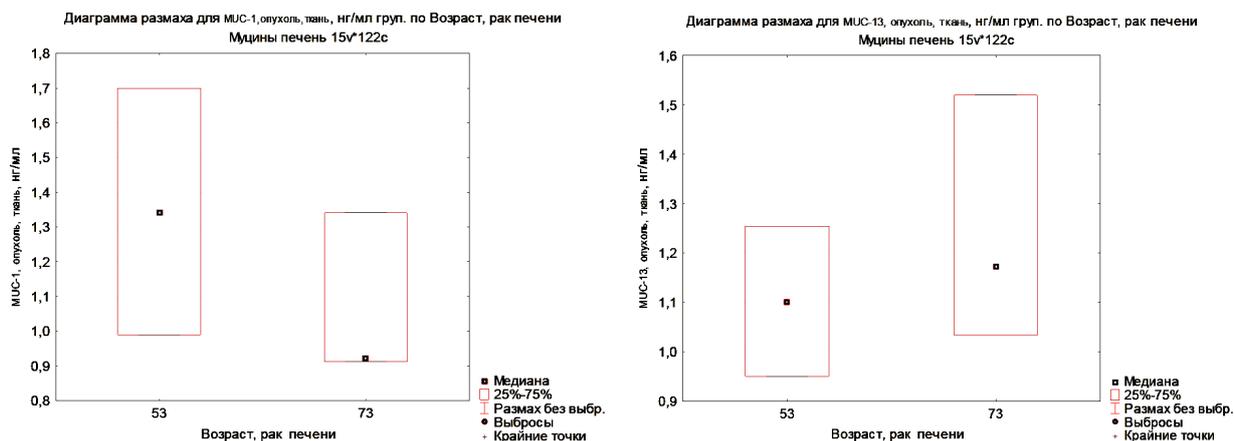
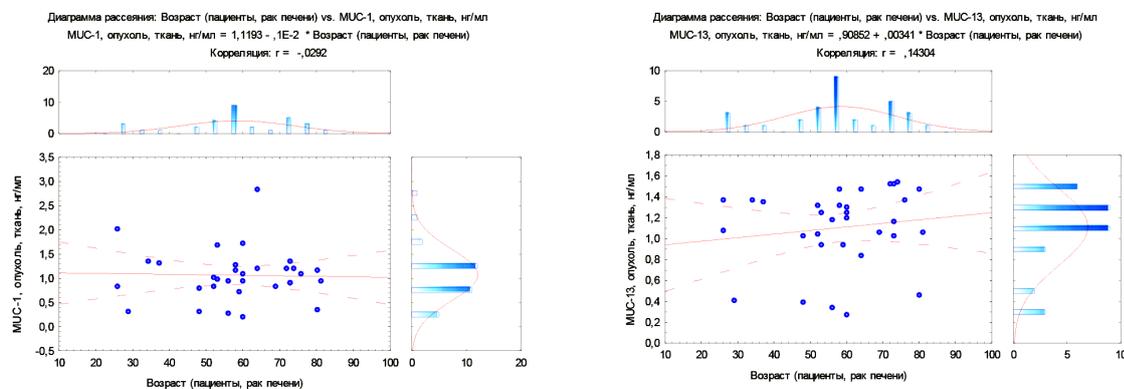


Рис. 3. Диаграмма размаха зависимости концентраций антител к муцинам MUC-1 (a) и MUC-13 (b) в ткани от возраста пациента

Fig. 3. Diagram of the range of dependence of the concentrations of antibodies to mucins MUC-1 (a) and MUC-13 (b) in the tissue from the age of the patient



Возраст, рак печени	В-Вес	Лег	В-Вес-знач.	Возраст, рак печени	В-Вес	Лег	В-Вес-знач.
		-0,000998	53		-0,052914		0,003411
св. член				св. член			
предсказанное				предсказанное			
-95,0 % ИС				-95,0 % ИС			
+95,0 % ИС				+95,0 % ИС			
Возраст, рак печени	-0,000998	73	-0,072881	Возраст, рак печени	0,003411	73	0,249019
св. член				св. член			
предсказанное				предсказанное			
-95,0 % ИС				-95,0 % ИС			
+95,0 % ИС				+95,0 % ИС			

a

b

Рис. 4. Множественная регрессии концентрации антител для переменных MUC-1 (a) и MUC-13 (b) в экстракте ткани в зависимости от возраста пациента, предсказанное значение концентраций (нг/мл) для лиц со злокачественными процессами печени

Fig. 4. Multiple regression of antibody concentration for variables MUC-1 (a) and MUC-13 (b) in tissue extract depending on the age of the patient, the predicted value of concentrations for individuals with liver cancer (ng/ml)

Заклучение. Установление пределов референтных (нормальных) значений MUC-1 ($0,250 \pm 0,10$ нг/мл) и MUC-13 ($0,321 \pm 0,13$ нг/мл) в сыворотке крови у практически здоровых лиц позволяет использовать данные показатели в качестве онкомаркеров для уточняющей диагностики РП и для мониторинга при его прогрессировании.

Концентрация антител к MUC-1 ($0,381 \pm 0,06$, $p = 0,002$) и MUC-13 ($0,940 \pm 0,39$, $p = 0,0001$) в сыворотке крови при РП достоверно выше значений у практически здоровых лиц.

При подтвержденном диагнозе РП уровень антител к MUC-1, превышающий в сыворотке крови $0,373$ нг/мл, и уровень антител к MUC-13 более $0,939$ нг/мл может указывать на высокий риск наличия опухолевого процесса.

Концентрация MUC-1 и MUC-13 в ткани опухоли при РП достоверно выше, чем в сыворотке крови практически здоровых лиц и пациентов с РП ($p < 0,05$).

Уровень экспрессии MUC-1 и MUC-13 в ткани опухоли не связан с возрастом (MUC-1 – $p = 0,77$; MUC-13 – $p = 0,29$) и полом пациентов (MUC-1 – $p = 0,63$, MUC-13 – $p = 0,74$).

Значения показателей MUC выше предсказанных концентраций в ткани печени: MUC-1 – $1,066$ нг/мл; MUC-13 – $1,089$ нг/мл на 53 году жизни пациента и MUC-1 – $1,046$ нг/мл и MUC-13 – $1,157$ нг/мл на 73 году жизни могут указывать на риск скрытого опухолевого процесса.

Список использованных источников

1. Кузнецов, О. Е. Вирус-ассоциированный гепатоцеллюлярный рак печени / О. Е. Кузнецов, В. М. Цыркунов // Гепатология и гастроэнтерология. – 2021. – Т. 5, № 1. – С. 17–24. <https://doi.org/10.25298/2616-5546-2021-5-1-17-24>
2. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries / H. Sung [et al.] // CA: Cancer J. Clin. – 2021. – Vol. 71, N 3. – P. 209–249. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>
3. Globocan 2020 – Global Cancer Observatory [Electronic resource]. – Mode of access: <https://gco.iarc.fr/today/data/factsheets/cancers/39-All-cancers-fact-sheet.pdf>. – Date of access: 21.03.2022.
4. Global burden of cancers attributable to infections in 2012: a synthetic analysis / M. Plummer [et al.] // Lancet Glob. Health. – 2016. – Vol. 4, N 9. – P. 609–616. [https://doi.org/10.1016/s2214-109x\(16\)30143-7](https://doi.org/10.1016/s2214-109x(16)30143-7)
5. Challenges in liver cancer and possible treatment approaches / D. Anwanwan [et al.] // Biochim. Biophys. Acta – Rev. Cancer. – 2020. – Vol. 1873, N 1. – Art. 188314. <https://doi.org/10.1016/j.bbcan.2019.188314>
6. Kasprzak, A. Mucins: the Old, the New and the Promising Factors in Hepatobiliary Carcinogenesis / A. Kasprzak, A. Adamek // Int. J. Mol. Sci. – 2019. – Vol. 20, N 6. – P. 1288. <https://doi.org/10.3390/ijms20061288>
7. Exploring the role and diversity of mucins in health and disease with special insight into non-communicable diseases / S. K. Behera [et al.] // Glycoconj. J. – 2015. – Vol. 32, N 8. – P. 575–613. <https://doi.org/10.1007/s10719-015-9606-6>
8. Weizmann Institute of Science. GeneCards [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.genecards.org/>. – Date of access: 22.03.2022.
9. Mucins: Structural diversity, biosynthesis, its role in pathogenesis and as possible therapeutic targets / S. S. Dhanisha [et al.] // Crit. Rev. Oncol. Hematol. – 2018. – Vol. 122. – P. 98–122. <https://doi.org/10.1016/j.critrevonc.2017.12.006>
10. Composition and functional role of the mucus layers in the intestine / M. E. Johansson [et al.] // Cell. Mol. Life Sci. – 2011. – Vol. 68, N 22. – P. 3635–3641. <https://doi.org/10.1007/s00018-011-0822-3>
11. Mucins in inflammatory bowel diseases and colorectal cancer / Y. H. Sheng [et al.] // J. Gastroenterol. Hepatol. – 2012. – Vol. 27, N 1. – P. 28–38. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1746.2011.06909.x>
12. MUC1 Specific Immune Responses Enhanced by Coadministration of Liposomal DDA/MPLA and Lipoglycopeptide / J. J. Du [et al.] // Front Chem. – 2022. – Vol. 10. – Art. 814880. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.814880>
13. Wi, D. H. Mucin in cancer: a stealth cloak for cancer cells / D. H. Wi, J. H. Cha, Y. S. Jung // BMB Rep. – 2021. – Vol. 54, N 7. – P. 344–355. <https://doi.org/10.5483/bmbrep.2021.54.7.064>
14. Expression of MUC1 and its significance in hepatocellular and cholangiocarcinoma tissue / S. F. Yuan [et al.] // World J. Gastroenterol. – 2005. – Vol. 11, N 30. – P. 4661–4666. <https://doi.org/10.3748/wjg.v11.i30.4661>
15. MUC13 promotes intrahepatic cholangiocarcinoma progression via EGFR/PI3K/AKT pathways / P. Tiemin [et al.] // J. Hepatol. – 2020. – Vol. 72, N 4. – P. 761–773. <https://doi.org/10.1016/j.jhep.2019.11.021>

References

1. Kuznetsov O. E., Tsyrukunov V. M. Virus-associated hepatocellular liver cancer. *Gepatologiya i gastroenterologiya = Hepatology and gastroenterology*, 2021, vol. 5, no. 1, pp. 17–24 (in Russian). <https://doi.org/10.25298/2616-5546-2021-5-1-17-24>
2. Sung H., Ferlay J., Siegel R. L., Laversanne M., Soerjomataram I., Jemal A., Bray F. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA: Cancer Journal for Clinicians*, 2021, vol. 71, no. 3, pp. 209–249. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>

3. *Globocan 2020 – Global Cancer Observatory*. Available at: <https://gco.iarc.fr/today/data/factsheets/cancers/39-All-cancers-fact-sheet.pdf> (accessed 21 March 2022).
4. Plummer M., de Martel C., Vignat J., Ferlay J., Bray F., Franceschi S. Global burden of cancers attributable to infections in 2012: a synthetic analysis. *Lancet Global Health*, 2016, vol. 4, no. 9, pp. 609–616. [https://doi.org/10.1016/s2214-109x\(16\)30143-7](https://doi.org/10.1016/s2214-109x(16)30143-7)
5. Anwanwan D., Singh S. K., Singh S., Saikam V., Singh R. Challenges in liver cancer and possible treatment approaches. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Reviews on Cancer*, 2020, vol. 1873, no. 1, art. 188314. <https://doi.org/10.1016/j.bbcan.2019.188314>
6. Kasprzak A., Adamek A. Mucins: the Old, the New and the Promising Factors in Hepatobiliary Carcinogenesis. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, vol. 20, no. 6, pp. 1288. <https://doi.org/10.3390/ijms20061288>
7. Behera S. K., Praharaj A. B., Dehury B., Negi S. Exploring the role and diversity of mucins in health and disease with special insight into non-communicable diseases. *Glycoconjugate Journal*, 2015, vol. 32, no. 8, pp. 575–613. <https://doi.org/10.1007/s10719-015-9606-6>
8. *Weizmann Institute of Science, GeneCards (2021)*. Available at: <https://www.genecards.org/> (accessed 22 March 2022).
9. Dhanisha S. S., Guruvayoorappan C., Drishya S., Abeesh P. Mucins: Structural diversity, biosynthesis, its role in pathogenesis and as possible therapeutic targets. *Critical Reviews in Oncology/Hematology*, 2018, vol. 122, pp. 98–122. <https://doi.org/10.1016/j.critrevonc.2017.12.006>
10. Johansson M. E., Ambort D., Pelaseyed T., Schütte A., Gustafsson J. K., Ermund A., Subramani D. B., Holmén-Larsson J. M., Thomsson K. A., Bergström J. H., van der Post S., Rodriguez-Piñero A. M., Sjövall H., Bäckström M., Hansson G. C. Composition and functional role of the mucus layers in the intestine. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2011, vol. 68, no. 22, pp. 3635–3641. <https://doi.org/10.1007/s00018-011-0822-3>
11. Sheng Y. H., Hasnain S. Z., Florin T. H., McGuckin M. A. Mucins in inflammatory bowel diseases and colorectal cancer. *Journal of Gastroenterology and Hepatology*, 2012, vol. 27, no. 1, pp. 28–38. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1746.2011.06909.x>
12. Du J. J., Zhou S. H., Cheng Z. R., Xu W. B., Zhang R. Y., Wang L. S., Guo J. MUC1 Specific Immune Responses Enhanced by Coadministration of Liposomal DDA/MPLA and Lipoglycopeptide. *Frontiers in Chemistry*, 2022, vol. 10, art. 814880. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.814880>
13. Wi D. H., Cha J. H., Jung Y. S. Mucin in cancer: a stealth cloak for cancer cells. *BMB Reports*, 2021, vol. 54, no. 7, pp. 344–355. <https://doi.org/10.5483/bmbrep.2021.54.7.064>
14. Yuan S. F., Li K. Z., Wang L., Dou K. F., Yan Z., Han W., Zhang Y. Q. Expression of MUC1 and its significance in hepatocellular and cholangiocarcinoma tissue. *World Journal of Gastroenterology*, 2005, vol. 11, no. 30, pp. 4661–4666. <https://doi.org/10.3748/wjg.v11.i30.4661>
15. Tiemin P., Fanzheng M., Peng X., Jihua H., Ruipeng S., Yaliang L., Yan W., Junlin X., Qingfu L., Zhefeng H., Jian L., Zihao G., Guoxing L., Boshi S., Ming Z., Qinghui M., Desen L., Lianxin L. MUC13 promotes intrahepatic cholangiocarcinoma progression via EGFR/PI3K/AKT pathways. *Journal of Hepatology*, 2020, vol. 72, no. 4, pp. 761–773. <https://doi.org/10.1016/j.jhep.2019.11.021>

Информация об авторах

Кузнецов Олег Евгеньевич – канд. биол. наук, доцент, директор. Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (пл. Антония Тызенгауза, 7, 230023, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: olegkuznetsov@inbox.ru. ORCID: 0000-0002-1348-8688.

Цыркунов Владимир Максимович – д-р мед. наук, профессор. Гродненский государственный медицинский университет (ул. Горького, 80, 230009, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: tvm111@mail.ru. ORCID: 0000-0002-9366-6789.

Керимова Сапартач Ширдогдыевна – врач патологоанатом. Гродненское областное клиническое патологоанатомическое бюро (Бульвар Ленинского Комсомола, 54а, 230030, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: kerimowa1993@bk.ru.

Information about the authors

Kuznetsov Oleg E. – Ph. D. (Medicine), Associate Professor, Director. Institute of Biochemistry of Biologically Active Compounds of the National Academy of Sciences of Belarus (7, Anthony Tyzengauz Square, 230023, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: olegkuznetsov@inbox.ru. ORCID: 0000-0002-1348-8688/

Tsyrkunov Vladimir M. – D. Sc. (Medicine), Professor. Grodno State Medical University (80, Gorky Str., 230009, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: tvm111@mail.ru. ORCID: 0000-0002-9366-6789.

Kerimova Sapartach Sh. – Pathologist. Grodno Regional Clinical Pathological Bureau (54a, Leninsky Komsomol Boulevard, 230030, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: kerimowa1993@bk.ru.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCESУДК 535.37
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-66-73>Поступило в редакцию 29.08.2022
Received 29.08.2022**С. А. Лысенко, П. О. Зайко***Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КРАТКОСРОЧНЫХ ЧИСЛЕННЫХ ПРОГНОЗОВ
ПОГОДЫ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МЕЗОМАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ WRF И ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ***(Представлено академиком В. Ф. Логиновым)*

Аннотация. Рассмотрена задача повышения точности численных прогнозов погоды для Беларуси на основе применяемой в национальной гидрометеорологической службе модели WRF за счет ассимиляции в ней данных дистанционного зондирования Земли. Показано, что для зимнего периода использование в модели спутниковых данных высокого пространственного разрешения по структуре землепользования, альbedo, листовом индексе и фотосинтетически активной радиации, поглощаемой подстилающей поверхностью, позволяет сократить среднеквадратическую погрешность краткосрочного прогноза приземной температуры воздуха (до 48 ч) на 0,53–1,11 °С. Для летнего периода на основе численных экспериментов установлен оптимальный коэффициент коррекции альbedo подстилающей поверхности, позволяющий сократить среднеквадратическую погрешность прогноза температуры на метеорологических станциях Беларуси для заблаговременности +12, +24, +36 и +48 ч в среднем на 0,30, 0,10, 0,15 и 0,16 °С соответственно.

Ключевые слова: численные прогнозы погоды, мезомасштабная модель WRF, ассимиляция данных дистанционного зондирования Земли

Для цитирования. Лысенко, С. А. Повышение точности краткосрочных численных прогнозов погоды для территории Беларуси с использованием мезомасштабной модели WRF и данных дистанционного зондирования Земли / С. А. Лысенко, П. О. Зайко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 1. – С. 66–73. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-66-73>

Sergey A. Lysenko, Polina O. Zaiko*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***IMPROVING THE ACCURACY OF SHORT-TERM NUMERICAL WEATHER FORECASTS
FOR THE TERRITORY OF BELARUS USING THE MESOSCALE WRF MODEL
AND EARTH REMOTE SENSING DATA***(Communicated by Academician Vladimir F. Loginov)*

Abstract. The problem of improving the WRF numerical weather model performance for the territory of Belarus by assimilating the Earth remote sensing data is considered. It is shown that for the winter period, the use of satellite data of high spatial resolution, including on the structure of land use, albedo, leaf index and photosynthetically active radiation absorbed by the underlying surface can reduce a root-mean-square error of the short-term forecast (up to 48 h) of the air surface temperature by 0.53–1.11 °C. For the summer period, on the basis of numerical experiments the optimal correction factor for the land surface albedo was estimated. This made it possible to reduce a root-mean-square error of temperature forecast at the meteorological stations of Belarus for the lead time of +12, +24, +36, and +48 h by an average of 0.30 °C, 0.10 °C, 0.15 °C, and 0.16 °C, respectively.

Keywords: numerical weather forecasts, WRF mesoscale model, Earth remote sensing data assimilation

For citation. Lysenko S. A., Zaiko P. O. Improving the accuracy of short-term numerical weather forecasts for the territory of Belarus using the mesoscale WRF model and earth remote sensing data. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 1, pp. 66–73 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-66-73>

Введение. В связи с быстрыми изменениями климата и возрастанием частоты опасных погодных явлений в последние годы все более высокие требования предъявляются к метеорологическим прогнозам и предупреждениям.

Критическое значение для точности численных прогнозов погоды имеет качество исходных данных о состоянии атмосферы и подстилающей поверхности. Для более репрезентативного задания в метеорологических моделях начальных условий помимо стандартных станционных наблюдений в последние годы все чаще используются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Вопросам повышения эффективности численных моделей прогноза погоды за счет ассимиляции в них данных ДЗЗ посвящено большое количество публикаций зарубежных авторов [1–7]. При этом, далеко не во всех работах достигается однозначно положительный эффект в части оправданности прогнозов метеорологических моделей, а результаты этих работ имеют строгую региональную привязку и не могут быть обобщены или перенесены на другие регионы. Для Беларуси задача использования данных ДЗЗ при разработке численных прогнозов погоды до настоящего времени не решалась.

В настоящей работе проведена актуализация геофизических характеристик на территории Беларуси в мезомасштабной модели WRF (The Weather Research and Forecasting), применяемой в национальной гидрометеорологической службе. С использованием современных баз данных ДЗЗ уточнено описание в модели структуры землепользования, альbedo и вегетационных характеристик подстилающей поверхности. Впервые получены оценки эффективности применения оперативных спутниковых данных для краткосрочного численного прогнозирования температуры воздуха на территории Беларуси в зимний и летний периоды.

Актуализация для территории Беларуси мезомасштабной системы численного прогноза погоды WRF. В качестве основного инструмента для краткосрочного прогнозирования метеорологических условий на территории Беларуси в настоящее время используется численная мезомасштабная модель атмосферных процессов WRF-ARW. Данная модель является негидростатической, интегрирующей уравнения движения на прямоугольной сетке методом конечных разностей [8]. Для описания мелкомасштабных (подсеточных) физических процессов в модели WRF используются схемы параметризации микрофизики, потоков длинноволновой и коротковолновой радиации, тепло- и влагообмена в почве, конвекции и турбулентности в планетарном пограничном слое атмосферы и др.

В качестве начальных и граничных условий во всех численных экспериментах авторами использовались прогнозы глобальной метеорологической модели GFS (Global Forecast System) с шагом сетки $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ [9]. Исходный срок моделирования состояния атмосферы – 00 UTC, заблаговременность прогноза +48 ч с выходными результатами через каждые 12 ч.

В оригинальной версии модели WRF задание характеристик подстилающей поверхности производится с помощью стандартной цифровой базы данных, включающей рельеф, классы землепользования, индекс листовой поверхности (LAI), альbedo, долю поглощаемой фотосинтетически активной радиации (FPAR), тип почвы и другие параметры. Актуализация модели WRF для территории Беларуси проводилась двумя способами. В первом способе использовалась база данных среднемесячных (медианных) характеристик подстилающей поверхности на основе временных рядов спутниковых продуктов за период с 2000 по 2020 г. Для задания пространственной структуры землепользования использовались данные Global Land Cover 2019 (GLC 2019) международной космической программы мониторинга Земли «Copernicus», а для альbedo, LAI и FPAR – база данных «The Global Land Surface Satellite» (GLASS).

Второй способ актуализации модели подстилающей поверхности основан на использовании ежедневно обновляемых (оперативных) спутниковых продуктов. Как и в первом подходе обновлению подлежали альbedo, LAI и FPAR. Однако в отличие от предыдущего варианта, использо-

вание оперативных спутниковых данных позволяет учитывать ежедневные изменения параметров подстилающей поверхности, зачастую сильно отличающиеся от их среднемесячных климатических значений. В качестве оперативных спутниковых данных для инициализации численной модели WRF авторами выбраны общедоступные данные спектрорадиометра MODIS – прибора NASA, установленного на космических аппаратах Terra и Aqua. Для заполнения пропусков в оперативных данных MODIS оперативные спутниковые продукты объединялись с медианными (климатическими) данными и на этой основе составлялись композитные пространственные распределения характеристик подстилающей поверхности, равномерно покрывающие весь исследуемый регион (рис. 1).

Сравнение оригинальной базы геофизических данных модели WRF с оперативными спутниковыми продуктами показывает их существенное различие для отдельных периодов. Так, в качестве примера на рис. 2 представлены пространственные распределения альbedo подстилающей поверхности для 1 июня 2021 г. Видно, что значения альbedo из стандартной базы данных WRF значительно ниже полученных по данным ДЗЗ. В частности, на карте композитного спутникового продукта альbedo отчетливо выделяются пахотные земли с достаточно высоким альbedo, которые практически не просматриваются на карте альbedo из стандартной базы данных WRF.

Для оценки влияния исходных данных на качество численного прогноза погоды проведен ряд численных экспериментов, включающих моделирование погодных условий для территории Беларуси при различных способах задания характеристик подстилающей поверхности:

без изменений базовых геофизических параметров модели WRF;

с использованием структуры землепользования из базы данных GLC 2019 и среднемесячных значений альbedo, LAI и FPAR, рассчитанных для периода 2000–2020 гг. на основе архива спутниковых данных GLASS;

с использованием оперативных спутниковых продуктов MODIS при сохранении в модели структуры землепользования, соответствующей данным GLC 2019.

Статистические оценки качества численных прогнозов приземной температуры. Оценки точности численных прогнозов погоды проводились в соответствии с рекомендациями Всемирной метеорологической организации (ВМО) на основе фактических, трехчасовых наблюдений на метеорологических станциях Беларуси.

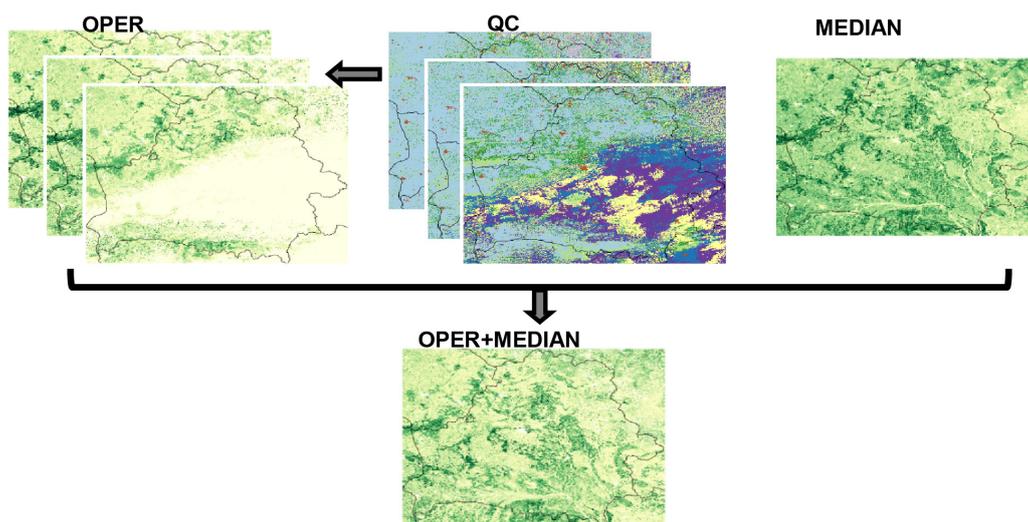


Рис. 1. Схема формирования оперативного композитного спутникового продукта LAI (листового индекса): OPER – оперативные спутниковые карты LAI за ближайший ко времени прогноза период; QC – индикаторы качества оперативных спутниковых продуктов; MEDIAN – среднемесячное (медианное) пространственное распределение LAI; OPER + MEDIAN – композитный оперативный продукт LAI

Fig. 1. Scheme for constructing an operational composite satellite product LAI (Leaf Area Index): OPER is LAI operational satellite maps for the nearest to forecast time period; QC is indicators of the quality of operational satellite products; MEDIAN is average monthly (median) spatial distribution of LAI; OPER + MEDIAN – composite operational LAI product

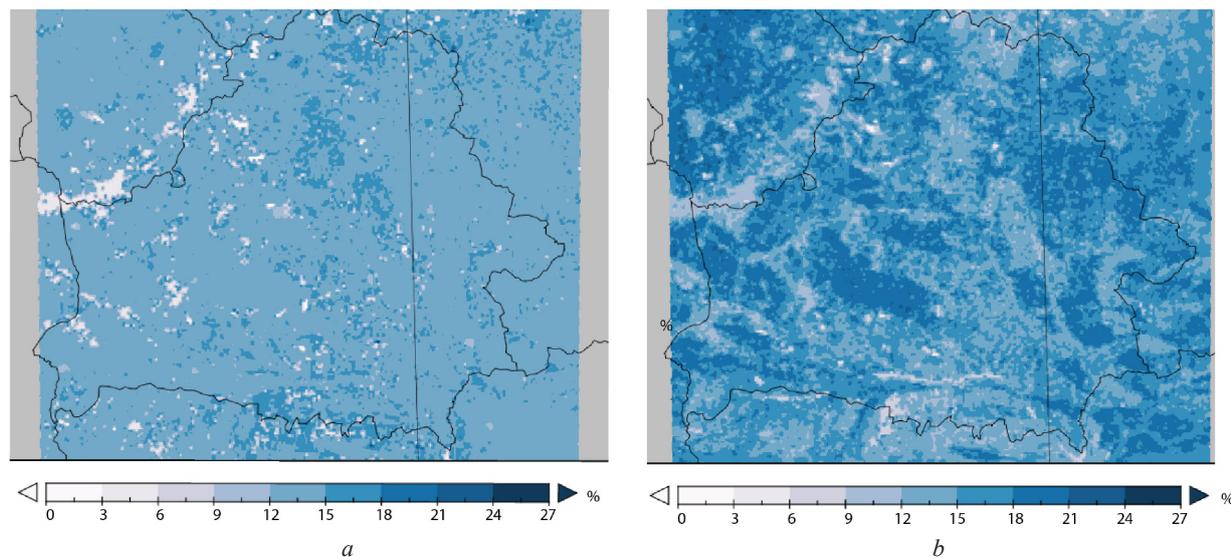


Рис. 2. Пространственные распределения альbedo подстилающей поверхности: *a* – оригинальная база данных WRF; *b* – композитный оперативный спутниковый продукт

Fig. 2. Maps of the spatial distribution of the surface albedo: *a* – original WRF database; *b* – composite operational satellite product

Результаты численных экспериментов показали, что использование одной и той же численной модели атмосферы при различных способах задания пространственной структуры землепользования и физических параметров подстилающей поверхности может приводить к существенным различиям в численных прогнозах радиационных, термических и конвективных процессов в пограничном слое атмосферы. Использование в модели WRF данных о землепользовании высокого пространственного разрешения и учет в ней временной изменчивости альbedo, LAI и FPAR позволили существенно уточнить распределение турбулентных потоков скрытого и явного тепла с подстилающей поверхности и сократить ошибку численного прогноза приземной температуры для зимнего периода при всех сроках прогнозирования (рис. 3). Наибольшее сокращение ошибок прогноза температуры наблюдается для дневного времени суток (сроки +12 и +36 ч),

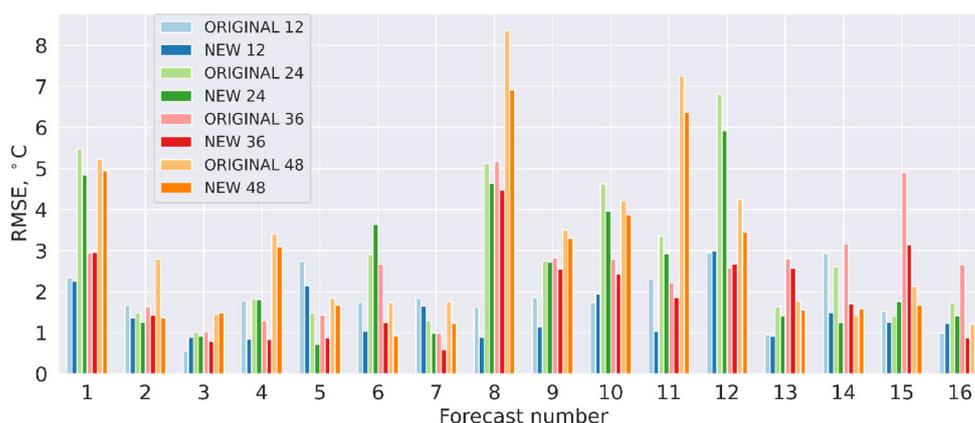


Рис. 3. Среднеквадратическая погрешность (RMSE) численного прогноза приземной температуры воздуха на территории Беларуси с заблаговременностью +12, +24, +36 и +48 ч для нескольких промоделированных метеорологических ситуаций: ORIGINAL и NEW – прогнозы на основе модели WRF со стандартным и актуализированным комплектами данных о подстилающей поверхности соответственно

Fig. 3. Root-mean-square error (RMSE) of the numerical forecast of surface air temperature on the territory of Belarus with a lead time of +12, +24, +36 and +48 h for several simulated meteorological situations: ORIGINAL and NEW are forecasts based on the WRF model with standard and updated land surface datasets respectively

что, вероятно, связано с более активным проявлением в дневные часы положительных обратных связей между альбедо и температурой подстилающей поверхности в зимние месяцы. Повышение точности прогноза температуры более отчетливо проявляется для поздних сроков (+36 и +48 ч), что объясняется быстрым «затуханием» влияния начального состояния атмосферы и слабо изменяющимся со временем влиянием граничных условий на результаты моделирования эволюции атмосферных процессов.

Достаточно показательный пример, демонстрирующий важность корректного учета структуры землепользования и физических параметров подстилающей поверхности при численных прогнозах погоды, представлен на рис. 4. Карты численного прогноза температуры воздуха на высоте 2 м, полученные при двух используемых цифровых моделях подстилающей поверхности (ORIGINAL – стандартная для WRF, NEW – актуализированная на основе данных GLC2019 и GLASS), демонстрируют существенные различия. Видно, что обновление цифровой модели подстилающей поверхности позволило уточнить фронтальные разделы на карте приземной температуры и обеспечило лучшее соответствие результатов численного моделирования данным метеорологических наблюдений. Среднеквадратическая погрешность прогноза температуры воздуха для дневных сроков +12 и +36 ч уменьшилась (в сравнении с прогнозом ORIGINAL) на 0,61 и 1,76 °C соответственно.

В рамках численных экспериментов было установлено, что среди изменяемых в модели WRF характеристик подстилающей поверхности наибольшее влияние на результаты численного прогноза температуры оказывает альбедо, роль которого особенно велика в зимние месяцы. В летние месяцы пространственная, и тем более временная изменчивость альбедо значительно меньше, поэтому для корректного учета его изменчивости в модели требуется достаточно высокая точность спутниковых измерений.

Как известно, альбедо подстилающей поверхности напрямую из космоса не измеряется, а рассчитывается по разновременным измерениям спектральных коэффициентов яркости на верхней границе атмосферы в рамках выбранной модели индикатрисы отражения поверхности [10]. Несоответствие этой модели реальным условиям обуславливает возникновение систематической ошибки в определении альбедо. В связи с этим авторами были проведены дополнительные численные эксперименты по прогнозированию метеорологических условий в Беларуси в летний период при различных коэффициентах коррекции альбедо. Расчеты выполнены при четырех значениях

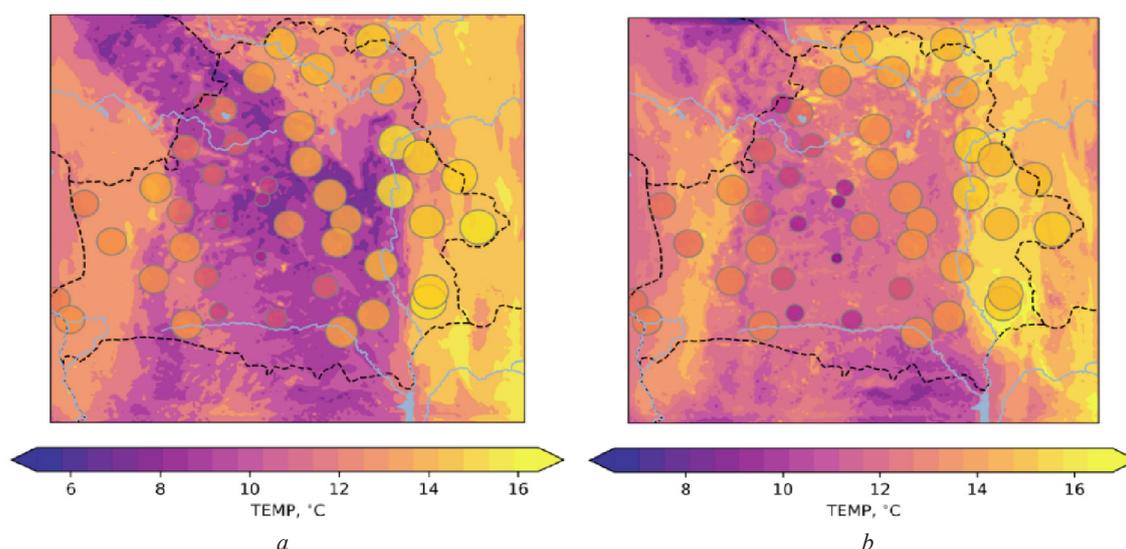


Рис. 4. Численный прогноз температуры воздуха с использованием в модели WRF оригинальных (а) и обновленных (б) геофизических данных. Окружностями разного диаметра и цвета показаны значения температуры на метеорологических станциях

Fig. 4. Numerical forecast of air temperature using the original (a) and updated (b) geophysical datasets in the WRF model. Circles of different diameters and colors show the temperature values at meteorological stations

поправочного коэффициента: 1,0 (сценарий `albedo_100` без коррекции альbedo), 0,25 (`albedo_25`), 0,5 (`albedo_50`) и 0,75 (`albedo_75`). Значения LAI и FPAR для исследуемого региона во всех экспериментах брались из обновленной базы данных для модели WRF. Дополнительно проводились расчеты с альbedo из оригинальной базы данных WRF (сценарий `original`), а также варианта с использованием стандартных значений альbedo, но с актуализированными среднемесячными значениями LAI и FPAR (сценарий `albedo_no`). В общей сложности было промоделировано более 60 дней с различными вариантами задания альbedo.

Анализ результатов эксперимента показал, что наименьшая среднеквадратическая погрешность прогноза приземной температуры достигается при поправочном коэффициенте для альbedo 0,25, что соответствует занижению значений альbedo, получаемого по данным MODIS, в 4 раза. В этом случае среднеквадратическая погрешность прогноза температуры на метеорологических станциях Беларуси для заблаговременности +12, +24, +36 и +48 ч уменьшается в среднем на 0,30, 0,10, 0,15 и 0,16 °C соответственно по отношению к прогнозу без корректировки альbedo (рис. 5).

Таким образом, наиболее перспективным для оперативных систем мезомасштабного прогнозирования погоды на территории Беларуси для летнего периода представляется подход, предполагающий ежедневную актуализацию геофизических характеристик подстилающей поверхности на основе оперативных спутниковых продуктов с коррекцией альbedo. При использовании в модели WRF оперативных данных ДЗЗ с коррекцией альbedo средняя и систематическая ошибки прогноза приземной температуры воздуха сокращаются как по отношению к оригинальному варианту модели WRF, так и по отношению к результатам прогноза с использованием обновленных среднемесячных геофизических данных.

Обе схемы обновления геофизических данных в модели WRF приводят к уменьшению среднеквадратической ошибки прогноза температуры для всех заблаговременностей. Для дневных сроков средняя абсолютная и среднеквадратическая ошибки прогноза температуры с использованием среднемесячных геофизических данных меньше, чем с использованием оперативных спутниковых продуктов. Для ночных сроков ситуация обратная. Наименее успешные результаты численного прогноза температуры при всех заблаговременностях соответствуют оригинальному для модели WRF набору геофизических данных.

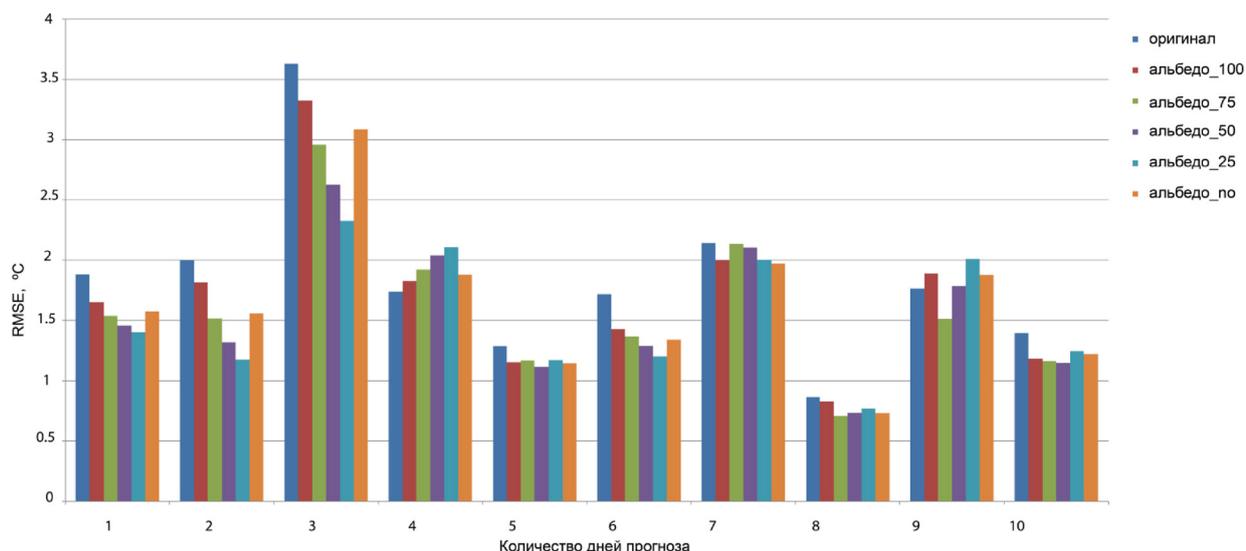


Рис. 5. Среднеквадратическая погрешность (RMSE) численного прогноза приземной температуры воздуха на территории Беларуси с заблаговременностью +12, +24, +36 и +48 ч для нескольких промоделированных летних метеорологических ситуаций с различными поправочными коэффициентами для альbedo (альbedo_100, альbedo_75, альbedo_50, альbedo_25, альbedo_no)

Fig. 5. Root mean square error (RMSE) of numerical forecast of surface air temperature on the territory of Belarus with a lead time of +12, +24, +36 and +48 h for several simulated summer meteorological situations with different albedo coefficients (albedo_100, albedo_75, albedo_50, albedo_25, albedo_no)

Заклучение. Авторами рассмотрены различные схемы актуализации характеристик подстилающей поверхности в мезомасштабной системе численного прогноза погоды WRF, применяемой в национальной гидрометеорологической службе, на основе среднемесячных и оперативных продуктов ДЗЗ (альbedo, листовой индекс, доля поглощаемой растительностью фотосинтетически активной радиации).

Сопоставление численных прогнозов приземной температуры с данными метеорологических наблюдений показало, что модель WRF с актуализированными наборами среднемесячных данных о подстилающей поверхности обеспечивает более качественный прогноз, особенно для сроков +12 и +36 ч (дневные часы). Уменьшение среднеквадратической погрешности прогноза приземной температуры при сроках +12, +24, +36 и +48 ч достигает 1,5, 1,3, 2,1 и 1,4 °C соответственно. В среднем для рассмотренных случаев уменьшение среднеквадратической погрешности прогноза температуры при указанных сроках составило 0,40, 0,35, 0,68 и 0,56 °C соответственно.

Для летнего периода на основе численных экспериментов был установлен оптимальный коэффициент коррекции альbedo 0,25 подстилающей поверхности, использование которого при моделировании погоды в Беларуси позволяет сократить среднеквадратическую погрешность прогноза температуры для заблаговременности +12, +24, +36 и +48 ч в среднем на 0,30, 0,10, 0,15 и 0,16 °C соответственно.

Дальнейшее повышение точности численных прогнозов погоды на территории Беларуси, по мнению авторов, возможно за счет большей детализации в описании подстилающей поверхности за пределами Беларуси, а также за счет ассимиляции в численных моделях прогноза погоды доступных наземных и спутниковых данных об атмосфере, включая профили скорости ветра, температуры и влажности. Перспективным также представляется использование для корректировки численных прогнозов погоды методов машинного обучения. К настоящему времени накоплен достаточно большой статистический материал об ошибках численных прогнозов метеорологических величин на станциях Беларуси, который может быть обобщен методами искусственного интеллекта и учтен при финальной обработке численных прогнозов погоды. Все это будет являться предметом дальнейших исследований авторов.

Список использованных источников

1. Evaluating the use of Aeolus satellite observations in the regional numerical weather prediction (NWP) model Harmonie-Arome / S. Hagelin [et al.] // *Atmos. Meas. Tech.* – 2021. – Vol. 14, N 9. – P. 5925–5938. <https://doi.org/10.5194/amt-14-5925-2021>
2. Effect of the ingestion in the WRF model of different Sentinel-derived and GNSS-derived products: analysis of the forecasts of a high impact weather event / M. Lagasio [et al.] // *Eur. J. Remote Sens.* – 2019. – Vol. 52, N 4. – P. 16–33. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1642799>
3. Integrating remote sensing data with WRF model for improved 2-m temperature and humidity simulations in China / D. Yan [et al.] // *Dynam. Atmos. Oceans.* – 2020. – Vol. 89. – Art. 101127. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2019.101127>
4. Sensitivity of the Weather Research and Forecast/Community Multiscale Air Quality modeling system to MODIS LAI, FPAR, and albedo / L. Ran [et al.] // *J. Geophys. Res. Atmos.* – 2015. – Vol. 120, N 16. – P. 8491–8511. <https://doi.org/10.1002/2015jd023424>
5. A New Land-Use Dataset for the Weather Research and Forecasting (WRF) Model / H. Li [et al.] // *Atmosphere.* – 2020. – Vol. 11, N 4. – P. 350. <https://doi.org/10.3390/atmos11040350>
6. Knist, S. Effects of land surface inhomogeneity on convection-permitting WRF simulations over central Europe / S. Knist, K. Goergen, C. Simmer // *Meteorol. Atmos. Phys.* – 2020. – Vol. 132, N 1. – P. 53–69. <https://doi.org/10.1007/s00703-019-00671-y>
7. Impact of refined land surface properties on the simulation of a heavy convective rainfall process in the Pearl River Delta region, China / M. Chang [et al.] // *APJAS.* – 2014. – Vol. 50, N 1. – P. 645–655. <https://doi.org/10.1007/s13143-014-0052-3>
8. A description of the Advanced Research WRF Model Version 4 / W. C. Skamarock [et al.] // *NCAR Techn. Boulder: National Center for Atmospheric Research.* – 2021. – 165 p.
9. Global Forecast System (GFS) [Rules for the citing sources] [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>. – Date of access: 01.05.2022.
10. Schaaf, C. MCD43A3: MODIS/Terra and Aqua BRDF/Albedo Daily L3 Global 500 m V006 [Data Set] / C. Schaaf, Z. Wang; NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. – Sioux Falls, SD, USA, 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD43A1.006>

References

1. Hagelin S., Azad R., Lindskog M., Schyberg H., Körnich H. Evaluating the use of Aeolus satellite observations in the regional numerical weather prediction (NWP) model Harmonie–Arome. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, vol. 14, no. 9, pp. 5925–5938. <https://doi.org/10.5194/amt-14-5925-2021>
2. Lagasio M., Pulvirenti L., Parodi A., Boni G., Pierdicca N., Venuti G., Realini E., Tagliaferro G., Barindelli S., Rommen B. Effect of the ingestion in the WRF model of different Sentinel-derived and GNSS-derived products: analysis of the forecasts of a high impact weather event. *European Journal of Remote Sensing*, 2019, vol. 52, no. 4, pp. 16–33. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1642799>
3. Yan D., Liu T., Dong W., Liao X., Luo S., Wu K., Zhu X., Zheng Zh., Wen X. Integrating remote sensing data with WRF model for improved 2-m temperature and humidity simulations in China. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2020, vol. 89, art. 101127. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2019.101127>
4. Ran L., Gilliam R., Binkowski F. S., Xiu A., Pleim J., Band L. Sensitivity of the Weather Research and Forecast/Community Multiscale Air Quality modeling system to MODIS LAI, FPAR, and albedo. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, vol. 120, no. 16, pp. 8491–8511. <https://doi.org/10.1002/2015jd023424>
5. Li H., Zhang H., Mamtimin A., Fan S., Ju C. A New Land-Use Dataset for the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 350. <https://doi.org/10.3390/atmos11040350>
6. Knist S., Goergen K., Simmer C. Effects of land surface inhomogeneity on convection-permitting WRF simulations over central Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2020, vol. 132, no. 1, pp. 53–69. <https://doi.org/10.1007/s00703-019-00671-y>
7. Chang M., Fan S., Fan Q., Chen W., Zhang Y., Wang Y., Wang X. Impact of refined land surface properties on the simulation of a heavy convective rainfall process in the Pearl River Delta region, China. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 645–655. <https://doi.org/10.1007/s13143-014-0052-3>
8. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J. G., Duda M. G., Barker D. M., Huang X.-Y. *A description of the Advanced Research WRF Model Version 4*. Boulder, Colorado, National Center for Atmospheric Research, 2019. 165 p.
9. *Global Forecast System (GFS)* [Rules for the citing sources]. Available at: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs> (accessed 01.05.2022).
10. Schaaf C., Wang Z. *MCD43A3: MODIS/Terra and Aqua BRDF/Albedo Daily L3 Global 500 m V006 [Data Set]*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center: Sioux Falls, SD, USA, 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD43A1.006>

Информация об авторах

Лысенко Сергей Александрович – д-р физ.-мат. наук, профессор, директор. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lysenko.nature@gmail.com.

Зайко Полина Олеговна – науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nature@ecology.basnet.by.

Information about the authors

Lysenko Sergey A. – D. Sc. (Physical and Mathematical), Professor, Director. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lysenko.nature@gmail.com.

Zaiko Polina O. – Researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nature@ecology.basnet.by.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**TECHNICAL SCIENCES**

УДК 544.463+546.55“81+669.017.165+621.762.2
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-74-82>

Поступило в редакцию 16.05.2022
Received 16.05.2022

**Академик НАН Беларуси П. А. Витязь¹, Т. Ф. Григорьева², В. И. Жорник¹,
С. А. Ковалева¹, В. И. Квашнин³, С. А. Петрова⁴, Е. Т. Девяткина²,
С. В. Восмериков², И. С. Веремей¹, академик РАН Н. З. Ляхов²**

¹Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

²Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Российская Федерация

³Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева, Новосибирск, Российская Федерация

⁴Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Российская Федерация

**МЕХАНОХИМИЧЕСКОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ
ОЛОВЯННЫХ БРОНЗ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОМ Cu_9Al_4**

Аннотация. Методами рентгеноструктурного анализа, оптической и электронной микроскопии изучено влияние условий механической активации смеси Cu–12 мас. % Sn с различным содержанием модификатора Cu_9Al_4 на структурно-фазовый состав и морфологию формируемых композитов. При механохимическом введении 10 мас. %-ной модифицирующей добавки в матрицу механосинтезированной оловянной бронзы в продукте формируется в основном тройной твердый раствор алюминия и олова в меди, $\text{Al}_{0,05}\text{Cu}_{0,9}\text{Sn}_{0,05}$. В случае 20 мас. %-ной модифицирующей добавки в продукте присутствуют твердый раствор олова в меди $\text{Cu}_{0,9}\text{Sn}_{0,1}$ и интерметаллид Cu_9Al_4 . Исследования механических и триботехнических характеристик материала, получаемого методом спекания под давлением, показали, что интенсивность изнашивания механохимически синтезированного порошка Cu–12 мас. % Sn незначительно меньше, чем у промышленной бронзы БрОФ 10-1, коэффициент трения f снижается в 1,4 раза, а диапазон разброса его значений достаточно широк $f = 0,7–0,9$. Модифицирование механосинтезированной бронзы Cu–12 мас. % Sn интерметаллидом Cu_9Al_4 позволяет снизить изнашиваемость в 1,4–1,8 раза и значительно снизить коэффициент трения (в 2 раза). Стабильное значение $f = 0,5$ достигается для механической активации состава Cu–12 мас. % Sn + 20 мас. % Cu_9Al_4 . Введение интерметаллида повышает микротвердость сплавов в 1,6–2,0 раза (до $H_{\mu} = 2730$ МПа) относительно сплава бронзы БрОФ 10-1 и механосинтезированной бронзы.

Ключевые слова: оловянная бронза, интерметаллид Cu_9Al_4 , модифицирование, механическая активация, спекание под давлением, интенсивность изнашивания, коэффициент трения, микротвердость

Для цитирования. Механохимическое модифицирование оловянных бронз интерметаллидом Cu_9Al_4 / П. А. Витязь [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 1. – С. 74–82. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-74-82>

**Academician of the NASB Pyotr A. Vityaz¹, Tatiana F. Grigoreva², Viktor I. Zhornik¹, Svetlana A. Kovaliova¹,
Vyacheslav I. Kvashnin³, Sofia A. Petrova⁴, Evgeniya T. Devyatkina², Sergey V. Vosmerikov², Ilya S. Veremey¹,
Academician of the RAS Nikolay Z. Lyakhov²**

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation

³M. A. Lavrentiev Institute of Hydrodynamics, Novosibirsk, Russian Federation

⁴Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

MECHANOCHEMICAL MODIFICATION OF TIN BRONZES WITH INTERMETALLIDE Cu_9Al_4

Abstract. The influence of the conditions of mechanical activation of a mixture of Cu–12 wt. % Sn with different content of the modifier Cu_9Al_4 on the structural-phase composition and morphology of the formed composites was studied by the methods of X-ray diffraction analysis, optical and electron microscopy. With the mechanochemical introduction of 10 wt. %

of the modifying additive into the matrix of mechanosynthesized tin bronze, the product mainly forms a ternary solid solution of aluminum and tin in copper, $Al_{0.05}Cu_{0.9}Sn_{0.05}$. In the case of 20 wt. % of the modifying additive, the product contains a solid solution of tin in copper $Cu_{0.9}Sn_{0.1}$ and an intermetallic compound Cu_9Al_4 . Studies of the mechanical and tribotechnical characteristics of the material obtained by sintering under pressure showed that the intensity of wear of bronze of the mechanochemically synthesized powder Cu–12 wt. % Sn is slightly less than that of industrial bronze BrTPh10-1, the friction coefficient f decreases by a factor of 1.4, and the range of its values is quite wide $f = 0.7–0.9$. Modification of mechanically synthesized Cu–12 wt. % Sn bronze with the Cu_9Al_4 intermetallic compound makes it possible to reduce wear by a factor of 1.4–1.8 and significantly reduces the friction coefficient (by a factor of 2). A stable value of $f = 0.5$ is achieved for the MA composition Cu–12 wt. % Sn + 20 wt. % Cu_9Al_4 . The introduction of an intermetallic compound increases the microhardness of the alloys by a factor of 1.6–2.0 (up to $H_{\mu} = 2730$ MPa) relative to the bronze alloy BrTPh10-1 and mechanically synthesized bronze.

Keywords: tin bronze, Cu_9Al_4 intermetallic compound, modification, mechanical activation, pressure sintering, wear rate, friction coefficient, microhardness

For citation. Vityaz P. A., Grigoreva T. F., Zhornik V. I., Kovaliova S. A., Kvashnin V. I., Petrova S. A., Devyatkina E. T., Vosmerikov S. V., Veremey I. S., Lyakhov N. Z. Mechanochemical modification of tin bronzes with intermetallide Cu_9Al_4 . *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 1, pp. 74–82 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-74-82>

Введение. В современных машинах и механизмах срок службы деталей нагруженных узлов трения (подшипники, втулки, вкладыши и др.) в большинстве случаев определяется изнашиванием их составных элементов. В машиностроении широко востребованы оловянные бронзы, которые обладают не только хорошими антифрикционными свойствами, коррозионной стойкостью, но и технологичностью, что обуславливает применение их порошков в различных методах консолидации от традиционного прессования с последующим спеканием до высокоэффективных методов электроплазменного спекания, а также в 3D-технологиях. Однако спеченные материалы имеют недостаточную твердость и прочность, что приводит к их интенсивному адгезионному износу [1; 2]. В связи с этим упрочнение бронзы и разработка модифицирующих и упрочняющих добавок являются актуальной задачей.

Основными проблемами при модифицировании сплавов керамическими модификаторами, и особенно наноразмерными, являются низкая смачиваемость и неравномерность их распределения в объеме материала. Отсутствие смачивания упрочняющих частиц расплавом может приводить к образованию пор на границе их раздела, которые являются причиной снижения прочностных характеристик материала и его пластичности, поэтому в последние годы возрастает интерес к использованию интерметаллидов в качестве модификаторов [3; 4]. Применение интерметаллидов обусловлено химической и механической совместимостью фаз и является перспективным не только с точки зрения дисперсного упрочнения, но и легирования с последующим твердорастворным или дисперсионным упрочнением с повышением износостойкости сплавов [5; 6]. В связи с этим представляет интерес модифицирование оловянной бронзы дисперсными интерметаллидами на основе меди, а в частности на основе соединения Cu_9Al_4 .

Одним из наиболее эффективных методов получения порошков с однородным распределением дисперсных включений является механохимический синтез, проводимый в высокоэнергетических планетарных шаровых мельницах [7]. Реализуемые условия ударно-сдвиговых воздействий приводят не только к интенсивному перемешиванию компонент, но и к интенсификации зернограницных взаимодействий в материалах, что способствует как изменению структурного состояния компонентов, так и протеканию химических реакций на границе раздела их фаз с образованием порошков наноструктурированных композитов. В последние годы механохимическим синтезом получены сплавы, композиты с интерметаллическими соединениями, пересыщенные твердые растворы [8], при этом фазовый состав и свойства механокомпозитов определяются режимами синтеза. Формирование нанокристаллической структуры композитов с неравновесной структурой границ зерен при последующей консолидации порошков может способствовать повышению растворимости компонент и гомогенности структуры с образованием дисперсных упрочняющих частиц при последующей термической обработке. Реализуемые при этом механизмы жидкофазного спекания с формированием расплава могут значительно влиять на морфологию материала.

В работе изучалось влияние условий высокоэнергетической механической активации смеси Cu–12 % Sn на фазовый состав синтезируемой оловянной бронзы и модифицирование ее интерметаллидом Cu_9Al_4 , а также физико-механические и триботехнические свойства материала, получаемого спеканием под давлением.

Материалы и методы исследования. В работе использовали порошки меди марки ПМС-1 и олова марки ПОЭ с размерами частиц ~ 40 мкм, а также порошок механохимически синтезированного наноструктурированного монофазного интерметаллида Cu_9Al_4 с размерами кристаллитов ~ 3 нм, с бимодальным распределением частиц по размерам в диапазонах 0,2–0,4 и 2–4 мкм и низким уровнем микронапряжений ($\sim 0,03$ %) [9].

Механическую активацию (МА) смеси порошков меди и олова в массовом соотношении 88 и 12 % соответственно проводили в планетарной шаровой мельнице АГО-2 с водяным охлаждением (внутренний объем стального барабана 250 см^3 , диаметр стальных (сталь ШХ-15) шаров 5 мм, загрузка шаров 200 г, навеска обрабатываемого образца 10 г, скорость вращения барабанов ~ 1000 об/мин вокруг общей оси) [10]. Длительность обработки порошковых смесей составляла 2 мин.

Модифицирование механосинтезированной бронзы Cu–12 мас. % Sn добавлением Cu_9Al_4 в количестве 10 и 20 мас. % Cu_9Al_4 проводили в тех же условиях, длительность механической обработки смесей – от 40 с до 8 мин. Во избежание окисления металлов все эксперименты проводили в среде аргона.

Консолидацию порошков проводили методом спекания под давлением в графитовых тиглях размером 10×8 мм, включающим предварительное холодное прессование при давлении 30 МПа, нагрев до температуры $950 \text{ }^\circ\text{C}$ с выдержкой 30 мин и последующее охлаждение на воздухе.

Структурно-фазовое состояние образцов после МА и спекания изучали методом рентгеновской дифракции на дифрактометре D8 Advance (CuK_α -излучение, позиционно-чувствительный детектор VANTEC-1, шаг $\Delta 2\theta = 0,021^\circ$, время в точке 494 с). Фазовый состав и кристаллическую структуру композитов определяли по данным рентгеновской дифракции с использованием программного пакета DIFFRAC^{plus}:EVA и базы данных Международного центра дифракционных данных (ICDD) PDF4. Параметры элементарных ячеек сосуществующих фаз рассчитывали методом наименьших квадратов с использованием программы Celref. Количественный фазовый анализ проводили по результатам полнопрофильного анализа по методу Ритвельда с использованием программного пакета DIFFRAC^{plus}:TOPAS. Микроструктурные характеристики (размер кристаллитов L и микронапряжения e) оценивали с использованием «дубль-Фойгт» (doubleVoigt) методологии. Для разделения вкладов в уширение пиков от L использовали функцию Лоренца, от e – функцию Гаусса.

Морфологию синтезированных порошковых сплавов и композитов и микроструктуру спекленных материалов исследовали с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) на приборе Hitachi-Tabletop TM-1000. Для съемки изображений использовали детектор обратно рассеянных электронов. Микроструктуру сплавов изучали на оптическом микроскопе МИКРО200.

Триботехнические испытания образцов цилиндрической формы размером 10×8 мм проводили в условиях сухого трения на автоматизированном трибометре АТВП [11], работающем по схеме возвратно-поступательного перемещения призматического образца по контртелу со скоростью 0,1 м/с и при номинальном контактном давлении 1,5 МПа. В качестве контртела использовали пластину, изготовленную из закаленной углеродистой стали 60Г с твердостью $HV = 7840$ МПа. В качестве триботехнических характеристик, подлежащих оценке в процессе испытаний, были выбраны массовый износ и коэффициент трения. Интенсивность изнашивания I_q определяли на стадии установившегося изнашивания как отношение потери массы к пути трения. Измерение микротвердости HV по Виккерсу проводили на приборе ПМТ-3 при нагрузке 1,96 Н (ГОСТ 9450–76).

Результаты и их обсуждение. В качестве материала бронзы механохимически синтезирован прекурсор бронзы Cu–12 мас. % Sn. Рентгеноструктурный анализ порошка, полученного при механической активации в течение 2 мин, показал наличие фаз остаточной меди, твердого раствора и интерметаллидов системы Cu–Sn (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Рентгеноструктурные параметры порошков механосинтезированной бронзы Cu–12 мас. % Sn и модифицированной 10 и 20 мас. % Cu₉Al₄

T a b l e 1. X-ray diffraction parameters of powders of mechanically synthesized bronze Cu–12 wt. % Sn and modified with 10 and 20 wt. % Cu₉Al₄

Параметры рентгеноструктурного анализа X-Ray Parameters		Cu–12Sn		Cu–12 мас. % Sn + 10 мас. % Cu ₉ Al ₄				Cu–12 мас. % Sn + 20 мас. % Cu ₉ Al ₄			
		2 мин МА	40 с МА	2 мин МА	4 мин МА	8 мин МА	40 с МА	2 мин МА	4 мин МА	8 мин МА	
Cu Fm-3m	<i>a</i> , Å	3,616									
	<i>c</i> , %	32,6	–	–	–	–	–	–	–	–	
Cu ₃ Sn Cmcm	<i>a</i> , Å	5,470	5,4920				5,4939	–	–	–	
	<i>c</i> , %	17,8	7,2	–	–	–	7,5	–	–	–	
Cu _{40,4} Sn ₁₁ F-43m	<i>a</i> , Å	17,926									
	<i>c</i> , %	6,1	–	–	–	–	–	–	–	–	
Cu _{0,9} Sn _{0,1} Fm-3m	<i>a</i> , Å	3,646	3,666				3,666	3,6697	3,6787	3,6799	
	<i>L</i> , нм		~10				~6	–	~130	~130	
	<i>c</i> , %	43,5	84	–	–	–	75	86,0	87,0	89,8	
Cu ₉ Al ₄ Fm-3m	<i>a</i> , Å		8,722	8,713	8,697	8,6968	8,719	8,7125	8,7053	8,699	
	<i>L</i> , нм		5	~15	~15	–	~10	~15	~15	~15	
	<i>c</i> , %	–	8,8	8	2,4	0,6	17,5	14,0	13,0	10,2	
Al _{0,05} Cu _{0,9} Sn _{0,05}	<i>a</i> , Å		–	3,669	3,6766	3,6818	–	–	–	–	
	<i>c</i> , %	–	–	86,0	94,8	99,4	–	–	–	–	

По данным РЭМ в смеси Cu + 12 мас. % Sn после механической активации в течение 2 мин формируется слоистая композиционная структура с размерами частиц 100–150 мкм. Модифицирующая добавка, механохимически синтезированный интерметаллид Cu₉Al₄, получена в порошковой смеси Cu + 20 мас. % Al и имеет нанокристаллическое строение с размерами кристаллитов ~3 нм [9]. Дальнейшее модифицирование механосинтезированной бронзы Cu–12 мас. % Sn (МА 2 мин) с 10 и 20 мас. % Cu₉Al₄ проведено при МА в течение 40 с–8 мин.

Рентгеноструктурный анализ модифицированного продукта МА с 10 мас. % Cu₉Al₄ в течение 40 с показал, что за это время остаточная медь полностью расходуется на формирование твердых растворов олова в меди, полностью исчезает интерметаллическое соединение Cu_{40,4}Sn₁₁ и уменьшается содержание интерметаллида Cu₃Sn (табл. 1). После 2 мин совместной активации этой смеси в продукте уже не обнаруживаются интерметаллические соединения системы медь–олово, а твердые растворы олова в меди превращаются в тройной твердый раствор олова и алюминия в меди Al_{0,05}Cu_{0,9}Sn_{0,05} (табл. 1). Незначительно уменьшается количество фазы Cu₉Al₄ и существенно возрастает размер его кристаллитов по сравнению с исходным. Появляется незначительное количество (~6 мас. %) фазы с дефицитом меди Cu_{8,58}Al_{4,42}.

При дальнейшей МА в течение 4 мин в продукте увеличивается содержание тройного твердого раствора алюминия и олова в меди и более чем в два раза снижается уровень микронапряжений *e* (от 1,85 до 0,8 %) в нем. Также более чем в два раза снижается содержание фазы с дефицитом меди и более чем в три раза – модифицирующей добавки Cu₉Al₄. Размеры кристаллитов и уровень микронапряжений этих фаз практически не изменяются. При увеличении времени МА до 8 мин в продукте полностью исчезает фаза с дефицитом меди Cu_{8,58}Al_{4,42} и практически полностью – модифицирующая добавка Cu₉Al₄, продукт МА представляет собой монофазный тройной твердый раствор алюминия и олова в меди Al_{0,05}Cu_{0,9}Sn_{0,05} (табл. 1).

Электронно-микроскопические исследования показали, что после механической активации в течение 40 с морфология частиц и их размеры практически не изменяются по сравнению с исходной механохимически синтезированной бронзой без модифицирующих добавок. При увеличении времени МА до 2 мин форма и размеры частиц изменяются незначительно (рис. 1, *a*). После 4 мин МА размер частиц заметно возрастает, их форма становится более «окатанной», а после МА в течение 8 мин формируются крупные с размерами 600–900 мкм сферические частицы (рис. 1, *c*). Согласно данным рентгеноструктурного анализа, именно при 8 мин МА система становится двухфазной: тройной твердый раствор олова и алюминия в меди и модифицирующая добавка Cu₉Al₄ (табл. 1). Такая морфология, вероятно, связана с высокой пластичностью полученного твердого раствора, как и в случае алюминиевых бронз (Cu–10 мас. % Al) [12].

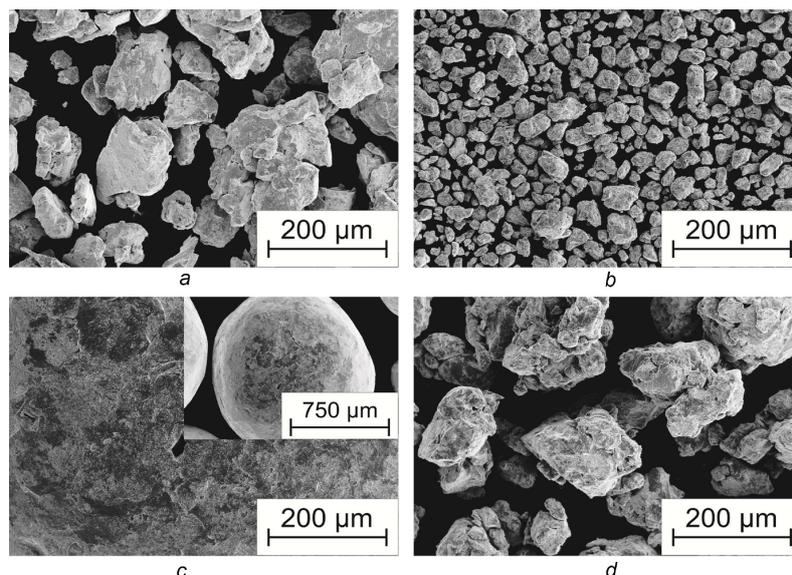


Рис. 1. РЭМ изображения частиц смесей Cu–12 мас. % Sn + 10 мас. % Cu₉Al₄ (a, c) и Cu–12 мас. % Sn + 20 мас. % Cu₉Al₄ (b, d) после МА в течение 2 мин (a, b) и 8 мин (c, d)

Fig. 1. SEM images of particles of mixtures of Cu–12 wt. % Sn + 10 wt. % Cu₉Al₄ (a, c) and Cu–12 wt. % Sn + 20 wt. % Cu₉Al₄ (b, d) after MA during 2 min (a, b) and 8 min (c, d)

На начальной стадии МА (40 с) смеси Cu–12 мас. % Sn (МА 2 мин) с 20 мас. % Cu₉Al₄ изменения аналогичны смеси с 10 мас. % Cu₉Al₄: полностью исчезают медь и интерметаллическое соединение Cu₄₁Sn₁₁, снижается содержание Cu₃Sn и почти в два раза возрастает содержание твердых растворов олова в меди с высоким уровнем микронапряжений ($e = 1,9\%$) и размерами кристаллитов $L \sim 6$ нм. Электронно-микроскопические данные свидетельствуют о схожести морфологических и размерных характеристик композитов, образующихся в смесях с 10 и 20 мас. % Cu₉Al₄.

Существенные отличия в дифракционной картине смеси с 20 мас. % Cu₉Al₄ наблюдаются после механической активации в течение 2 мин: не образуются ни тройной твердый раствор алюминия и олова в меди, ни твердый раствор алюминия в меди.

Система становится двухфазной: основной фазой является твердый раствор олова в меди с уровнем микронапряжений выше $e \sim 2\%$, в смеси остается модифицирующая добавка Cu₉Al₄, размеры кристаллитов которой возрастают более чем в три раза по сравнению с исходным интерметаллическим соединением (табл. 1). Данные РЭМ (рис. 1, b) также свидетельствуют о формировании существенно более мелких порошков. После 4 мин МА фазовый и количественный состав сохраняется; снижается уровень микронапряжений твердого раствора олова в меди, а размер его кристаллитов составляет более 100 нм (табл. 1). По сравнению с 2 мин МА частицы композита незначительно укрупняются.

После 8 мин МА фазовый состав практически не изменяется, количество твердого раствора олова в меди увеличивается на 2 %, а интерметаллического соединения Cu₉Al₄ – уменьшается до 10,2 мас. % (табл. 1). Размер частиц порошка увеличивается до 70–400 мкм, но остается значительно более мелким по сравнению с тройным твердым раствором алюминия и олова в меди в смеси Cu–12 мас. % Sn с 10 мас. % Cu₉Al₄ (рис. 1, d).

Таким образом, наиболее значительные структурные изменения в порошковых смесях механосинтезированной бронзы и интерметаллида Cu₉Al₄ происходят при 2 мин механической активации в высокоэнергетической планетарной мельнице. Консолидацию таких порошков, модифицированных 10 и 20 мас. % Cu₉Al₄, проводили методом спекания под давлением.

Сплавы состава медь–олово характеризуются склонностью к неравновесной кристаллизации, что сужает область существования α -твердого раствора. Так, при значении предельной растворимости олова в меди 15,1 мас. %, однофазная структура твердого раствора формируется

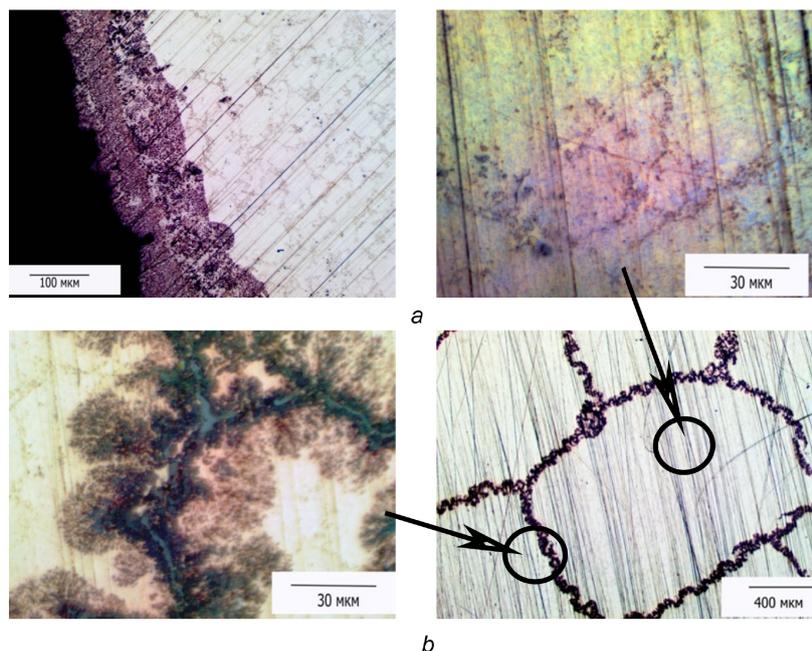


Рис. 2. Микроструктура сплавов на основе механокомпозитов смеси Cu–12 мас. % Sn + 20 мас. % Cu_9Al_4 2 мин МА: *a* – после спекания; *b* – после отжига при 520 °C 1 ч

Fig. 2. Microstructure of alloys based on mechanocomposites of a mixture of Cu–12 wt. % Sn + 20 wt. % Cu_9Al_4 2 min MA: *a* – after sintering; *b* – after annealing at 520 °C for 1 hour

в бронзах с содержанием олова до 6–8 мас. %, а при повышении наблюдается образование эвтектоида ($\alpha + \delta$), где δ -фаза – $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$ [13]. Применение для спекания механосинтезированных порошков бронз Cu–12 мас. % Sn позволяет расширить область твердого раствора и получить однофазный сплав с полным растворением олова в решетке меди, о чем свидетельствуют данные РСА $a_{\text{Cu}} = 0,3678$ нм. Используя эмпирическое правило Вегарда о линейной зависимости между параметрами кристаллической решетки сплава и концентрацией элементов, можно показать, что в решетке содержится олова 6,7 ат. %. Проведение отжига спеченного материала при $T = 520$ °C в течение 1 ч приводит к росту размеров кристаллитов L от 72 до 112 нм. Структура такой бронзы сохраняется однофазной и однородной, в то время как в сплаве бронзы БрОФ 10-1 после отжига в отдельных зернах и по границам зерен выпадают интерметаллические включения.

Модифицирование порошков механосинтезированной бронзы Cu–12 мас. % Sn частицами Cu_9Al_4 в количестве 10 и 20 мас. % при спекании приводит к частичному вытеснению интерметаллидов к свободной поверхности образца, что особенно явно наблюдается для порошков с более высоким их содержанием (рис. 2, *a*).

По данным РСА в обоих составах в процессе жидкофазного спекания интерметаллиды Cu_9Al_4 частично растворяются с формированием твердого раствора (параметр решетки $a_{\text{Cu}} = 0,3666$ нм) и образованием интерметаллида $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$, что приводит к снижению их содержания в 2 раза (до 4 и 10 мас. % соответственно). Высокотемпературный отжиг при $T = 520$ °C меняет морфологию поверхности сплава с перераспределением фаз и образованием локальных тройных эвтектоидов и дендритов (рис. 2, *b*), что указывает на появление жидкой фазы. Образующиеся дендриты сплава состава Cu–12 мас. % Sn + 20 мас. % Cu_9Al_4 формируют крупночешуйчатую сетку, но зерно является дисперсно-упрочненным. Размер кристаллитов твердого раствора на основе меди в сплавах после отжига уменьшается от 79 до 36 нм, а параметр решетки твердого раствора снижается до $a_{\text{Cu}} = 0,3655$ нм, что указывает на его распад с выделением упрочняющей фазы. Размер кристаллитов интерметаллида $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$ при отжиге увеличивается от 43 до 62 нм, Cu_9Al_4 – от 23 до 28 нм.

Стоит отметить, что температура фазовых переходов и плавления интерметаллида Cu_9Al_4 выше 780 °C, а температура эвтектики составляет $T = 548$ °C. Можно предположить, что для

механосинтезированных порошков эвтектика образуется при более низкой температуре, чему могут способствовать особенности структуры механосинтезированного интерметаллида Cu_9Al_4 , такие как малый размер кристаллитов и обогащенные алюминием зернограничные области.

Для модифицированных материалов на основе механосинтезированной бронзы Cu –12 мас. % Sn с 10 и 20 мас. % Cu_9Al_4 исследованы физико-механические и триботехнические свойства до и после термической обработки в сравнении со сплавом бронзы БрОФ 10-1, полученным в одинаковых условиях. Так, сплавы на основе механосинтезированных порошков бронзы имеют микротвердость на 42 % выше относительно бронзы БрОФ 10-1 (табл. 2). Модифицирование механосинтезированной бронзы Cu –12 мас. % Sn порошками интерметаллида в количестве 10–20 % приводит к упрочнению материала в 1,6–2,0 раза с сохранением высоких значений микротвердости и после отжига при 520 °С.

Т а б л и ц а 2. Механические и триботехнические характеристики образцов на основе бронзы

T a b l e 2. Mechanical and tribological characteristics of specimens based on bronze

Материал Material	Интенсивность изнашивания, мг/м Wear rate, mg/m	Коэффициент трения, f Friction coefficient, f	Микротвердость H_{μ} , МПа Microhardness H_{μ} , МПа
БрОФ 10-1	0,046	0,98–1,12	1372 ± 77
Cu –12 мас. % Sn	0,042	0,7–0,9	1473 ± 58
Cu –12 мас. % Sn , отжиг 520 °С	0,035	0,7–0,9	1321 ± 37
Cu –12 мас. % Sn + 10 мас. % Cu_9Al_4	0,030	0,6–0,7	2252 ± 67
Cu –12 мас. % Sn + 10 мас. % Cu_9Al_4 , отжиг 520 °С	0,026	0,6–0,7	2046
Cu –12 мас. % Sn + 20 мас. % Cu_9Al_4	0,033	0,5	2732 ± 52
Cu –12 мас. % Sn + 20 мас. % Cu_9Al_4 , отжиг 520 °С	0,029	0,5	2720

В связи с этим можно предположить, что модифицирование механосинтезированной бронзы снижает адгезионные взаимодействия в паре трения со сталью за счет повышения микротвердости материалов, что способствует снижению коэффициента трения в 1,4–2,0 раза. Также в формировании трибослоя и его устойчивости на медных сплавах могут играть роль и происходящие окислительные процессы [14]. Высокая адгезия и неоднородность поверхности приводят к постоянному обновлению контактной поверхности и ее окислению. Можно предположить, что микроструктурная модификация механосинтезированных бронз способствует снижению скорости изнашивания за счет повышения адгезионной и абразивной устойчивости формируемого защитного кислородсодержащего трибослоя.

Закключение. Механохимически синтезированная оловянная бронза модифицирована интерметаллидом Cu_9Al_4 в количестве 10 и 20 мас. %. Показано, что при 10 мас. % Cu_9Al_4 механохимически формируется тройной твердый раствор олова и алюминия в меди, а при 20 мас. % Cu_9Al_4 в продукте сохраняется интерметаллид Cu_9Al_4 и формируется твердый раствор олова в меди.

При спекании под давлением механохимически синтезированного порошка Cu –12 мас. % Sn интенсивность изнашивания незначительно меньше, чем у бронзы БрОФ 10-1, коэффициент трения снижается в 1,4 раза, однако диапазон разброса его значений достаточно широк $f = 0,7–0,9$. Модифицирование механосинтезированной бронзы Cu –12 мас. % Sn интерметаллидом Cu_9Al_4 позволяет снизить изнашиваемость материала в 1,4–1,8 раза и значительно снизить коэффициент трения (в 2 раза). Стабильное значение коэффициента трения $f = 0,5$ достигается для состава Cu –12 мас. % Sn + 20 мас. % Cu_9Al_4 .

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект № T20P-037) и РФФИ (проект № 20-53-00037).

Acknowledgements. The work has been sponsored by the BRFFR (project no. T20P-037) and the RFBR (project no. 20-53-00037).

Список использованных источников

1. Nadolski, M. The evaluation of mechanical properties of high-tin bronzes / M. Nadolski // Arch. Foundry Engineering. – 2017. – Vol. 17, N 1. – P. 127–130. <https://doi.org/10.1515/afe-2017-0023>
2. Wear resistance and electroconductivity in copper processed by severe plastic deformation / A. P. Zhilyaev [et al.] // Wear. – 2013. – Vol. 305, N 1–2. – P. 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.06.001>

3. Использование химического синтеза нанодисперсных модификаторов при индукционном нагреве шихты на основе порошков оловянных бронз для упрочнения и повышения триботехнических свойств наплавляемых покрытий / И. А. Сосновский [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 3(84). – С. 111–116.
4. On some mechanical properties and wear behavior of sintered bronze based composites reinforced with some aluminides microadditives / E. Feldshtein [et al.] // *Int. J. of Applied Mechanics and Engineering*. – 2017. – Vol. 22, N 2. – P. 293–302. <https://doi.org/10.1515/ijame-2017-0017>
5. Microstructure, properties and wear behaviors of $(\text{Ni}_3\text{Al})_p$ reinforced Cu matrix composites / İ. Celikyurek [et al.] // *J. Mater. Sci. Technol.* – 2011. – Vol. 27, N 10. – P. 937–943. [https://doi.org/10.1016/s1005-0302\(11\)60167-9](https://doi.org/10.1016/s1005-0302(11)60167-9)
6. Interaction between $\text{Fe}_{66}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_5\text{B}_{19}$ metallic glass and aluminum during spark plasma sintering / D. V. Dudina [et al.] // *Mater. Sci. Eng.* – 2021. – Vol. 799. – Art. 140165. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140165>
7. Григорьева, Т. Ф. Механохимический синтез в металлических системах / Т. Ф. Григорьева, А. П. Барина, Н. З. Ляхов. – Новосибирск, 2008. – 167 с.
8. Grigorieva, T. F. Mechanochemical synthesis of nanocomposites / T. F. Grigorieva, A. P. Barinova, N. Z. Lyakhov // *J. Nanoparticle Research*. – 2003. – Vol. 5, N 5–6. – P. 439–453. <https://doi.org/10.1023/b:nano.0000006093.26430.3b>
9. Механохимический синтез порошков сплавов системы Cu–Al и их консолидация методом электроннолучевого спекания / Т. Ф. Григорьева [и др.] // *Физика металлов и металлургия*. – 2021. – Т. 122, № 7. – С. 729–736.
10. Аввакумов, Е. Г. Механические методы активации химических процессов / Е. Г. Аввакумов. – Новосибирск, 1986. – 302 с.
11. Караваев, М. Г. Автоматизированный трибометр с возвратно-поступательным движением / М. Г. Караваев, В. А. Кукареко // *Надежность машин и технических систем: тр. Междунар. науч.-техн. конф.* – Минск, 2001. – Т. 2. – С. 37–39.
12. Коростелева, Е. Н. Формирование структуры и механические свойства спеченной алюминиевой бронзы / Е. Н. Коростелева. – Томск, 2000. – 218 с.
13. Saunders, N. The Cu–Sn (copper-tin) system / N. Saunders, A. P. Miodownik // *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*. – 1990. – Vol. 11, N 3. – P. 278–287. <https://doi.org/10.1007/bf03029299>
14. Moharami, A. Improving the dry sliding-wear resistance of as-cast Cu-10Sn-1P alloy through accumulative back extrusion (ABE) process / A. Moharami // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Vol. 9, N 5. – P. 10091–10099. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.022>

References

1. Nadolski M. The evaluation of mechanical properties of high-tin bronzes. *Archives of Foundry Engineering*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 127–130. <https://doi.org/10.1515/afe-2017-0023>
2. Zhilyaev A. P., Shakhova I., Belyakov A., Kaibyshev R., Langdon T. G. Wear resistance and electroconductivity in copper processed by severe plastic deformation. *Wear*, 2013, vol. 305, no. 1–2, pp. 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.06.001>
3. Sosnovsky I. A., Kuznechik O. O., Golodok R. P., Belyavin K. E. Use of chemical synthesis of nanodisperse modifiers at induction heating of furnace charge on the basis of powders tin bronze for hardening and increase of tribotechnical properties of the fuse-on coverings. *Lit'e metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2016, no. 3(84), pp. 111–116 (in Russian).
4. Feldshtein E., Kielek P., Kielek T., Dyachkova L., Letsko A. On some mechanical properties and wear behavior of sintered bronze based composites reinforced with some aluminides microadditives. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 2017, vol. 22, no. 2, pp. 293–302. <https://doi.org/10.1515/ijame-2017-0017>
5. Celikyurek İ., Korpe N. O., Olcer T., Galer R. Microstructure, properties and wear behaviors of $(\text{Ni}_3\text{Al})_p$ reinforced Cu matrix composites. *Journal of Materials Science & Technology*, 2011, vol. 27, no. 10, pp. 937–943. [https://doi.org/10.1016/s1005-0302\(11\)60167-9](https://doi.org/10.1016/s1005-0302(11)60167-9)
6. Dudina D. V., Bokhonov B. B., Batraev I. S., Amirastanov Y. N., Ukhina A. V., Kuchumova I. D., Legan M. A., Novoselov A. N., Gerasimov K. B., Bataev I. A., Georgarakis K., Koga G. Y., Guo Y., Botta W. J., Jorge A. M. Interaction between $\text{Fe}_{66}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_5\text{B}_{19}$ metallic glass and aluminum during spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, vol. 799, art. 140165. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140165>
7. Grigor'eva T. F., Barinova A. P., Lyakhov N. Z. *Mechanochemical synthesis in metallic systems*. Novosibirsk, 2008. 167 p. (in Russian).
8. Grigorieva T. F., Barinova A. P., Lyakhov N. Z. Mechanochemical synthesis of nanocomposites. *Journal of Nanoparticle Research*, 2003, vol. 5, no. 5–6, pp. 439–453. <https://doi.org/10.1023/b:nano.0000006093.26430.3b>
9. Grigorieva T. F., Dudina D. V., Vosmerikov S. V., Devyatkina E. T., Udalova T. A., Lyakhov N. Z., Petrova S. A., Kovaleva S. A., Batraev I. S., Kiseleva T. Y., Zholudev S. I., Polyakov S. N. Mechanochemical synthesis of Cu–Al alloyed powders and their consolidation by spark plasma sintering. *Physics of Metals and Metallography*, 2021, vol. 122, no. 7, pp. 681–687. <https://doi.org/10.1134/s0031918x21070024>
10. Avvakumov E. G. *Mechanical methods of activation of chemical processes*. Novosibirsk, 1986. 302 p. (in Russian).
11. Karavaev M. G., Kukareko V. A. Automated reciprocating tribometer. *Nadezhnost' mashin i tekhnicheskikh sistem: Trudy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. T. 1* [Reliability of machines and technical systems: Proceedings of the International scientific and technical conference. Vol. 1]. Minsk, 2001, pp. 37–39 (in Russian).

12. Korosteleva E. N. *Structure Formation and Mechanical Properties of Sintered Aluminum Bronze*. Tomsk, 2000. 218 p. (in Russian).

13. Saunders N., Miodownik A. P. The Cu–Sn (copper-tin) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1990, vol. 11, no. 3, pp. 278–287. <https://doi.org/10.1007/bf03029299>

14. Moharami A. Improving the dry sliding-wear resistance of as-cast Cu-10Sn-1P alloy through accumulative back extrusion (ABE) process. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, no. 5, pp. 10091–10099. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.022>

Информация об авторах

Витязь Петр Александрович – академик, д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vityaz@prezidium.bas-net.by.

Григорьева Татьяна Федоровна – д-р хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН (ул. Кутателадзе, 18, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: grig@solid.nsc.ru.

Жорник Виктор Иванович – д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zhornikv@gmail.com.

Ковалева Светлана Анатольевна – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: svetakov2021@gmail.com.

Квашнин Вячеслав Игоревич – аспирант, мл. науч. сотрудник. Институт гидродинамики им. Лаврентьева СО РАН (пр. Лаврентьева, 15, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: slava.kvashnin@mail.ru.

Петрова Софья Александровна – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Институт металлургии УрО РАН (ул. Амундсена, 101, 620016, Екатеринбург, Российская Федерация). E-mail: danaus@mail.ru.

Десяткина Евгения Тимофеевна – науч. сотрудник. Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН (ул. Кутателадзе, 18, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: devyatkina@solid.nsc.ru.

Восмериков Сергей Владимирович – науч. сотрудник. Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН (ул. Кутателадзе, 18, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: vosmerikov@solid.nsc.ru.

Веремей Илья Сергеевич – техник. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: stetarium@gmail.com.

Ляхов Николай Захарович – академик, д-р хим. наук, науч. руководитель Института. Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН (ул. Кутателадзе, 18, 630090, Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: lyakhov@solid.nsc.ru.

Information about the authors

Vityaz Pyotr A. – Academician, D. Sc. (Engineering), Professor, Chief Researcher. Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vityaz@prezidium.bas-net.by.

Grigoreva Tatiana F. – D. Sc. (Chemistry), Leading Researcher. Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the SB of the RAS (18, Kutateladze Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: grig@solid.nsc.ru.

Zhornik Viktor I. – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory. Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zhornikv@gmail.com.

Kovaliova Svetlana A. – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher. Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svetakov2021@gmail.com.

Kvashnin Vyacheslav I. – Junior Researcher. M. A. Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the SB of the RAS (15, Lavrentyev Ave., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: slava.kvashnin@mail.ru.

Petrova Sofia A. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher. Institute of Metallurgy of the UB of the RAS (101, Amundsen Str., 620016, Yekaterinburg, Russian Federation). E-mail: danaus@mail.ru.

Devyatkina Evgeniya T. – Researcher. Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the SB of the RAS (18, Kutateladze Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: devyatkina@solid.nsc.ru.

Vosmerikov Sergey V. – Researcher. Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the SB of the RAS (18, Kutateladze Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: vosmerikov@solid.nsc.ru.

Veremey Ilya S. – Technician. Joint United Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: stetarium@gmail.com.

Lyakhov Nikolay Z. – Academician, D. Sc. (Chemistry), Scientific Supervisor of the Institute. Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the SB of the RAS (18, Kutateladze Str., 630090, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: lyakhov@solid.nsc.ru.

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

АГРАРНЫЕ НАУКИ
AGRARIAN SCIENCES

УДК 621.86.04
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-83-88>

Поступило в редакцию 03.01.2023
Received 03.01.2023

Академик З. В. Ловкис

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

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
СИСТЕМЫ ГИДРОТРАНСПОРТА ПЛОДОВООВОЩНОГО СЫРЬЯ**

Аннотация. Проведены результаты исследования характеристик новых сортов плодов, корнеклубнеплодов, ягод и овощей, которые могут перемещаться в потоке жидкости. Изучено их взаимодействие с поверхностями трения лотков, изготовленных из различных строительных материалов. Установлены коэффициенты трения качения и скольжения плодов и овощей по смоченным поверхностям открытых каналов и лотков, которые могут быть использованы в гидравлических расчетах при определении основных параметров гидротранспортной установки.

Ключевые слова: гидротранспорт, коэффициент, трение, плоды и овощи, расчет, насос, вода, твердость

Для цитирования. Ловкис, З. В. Экспериментальное определение параметров системы гидротранспорта плодово-овощного сырья / З. В. Ловкис // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 1. – С. 83–88. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-83-88>

Academician Zenon V. Lovkis

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

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE PARAMETERS
OF THE HYDRAULIC TRANSPORT SYSTEM OF FRUIT AND VEGETABLES**

Abstract. The results of study of the characteristics of new varieties of fruits, root crops, berries, and vegetables that can move in the fluid flow are obtained. Their interaction with the friction surfaces of trays made of various building materials has been studied. The friction coefficients of rolling and sliding of fruits and vegetables on the wetted surfaces of open channels and trays have been established. They can be used in hydraulic calculations when determining the main parameters of a hydraulic transport installation.

Keywords: hydraulic transport, coefficient, friction, fruits and vegetables, calculation, pump, water, hardness

For citation. Lovkis Z. V. Experimental determination of the parameters of the hydraulic transport system of fruit and vegetables. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 1, pp. 83–88 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-83-88>

Введение. В установках гидравлического транспорта нерастворимый продукт перемещается по трубопроводам или открытым желобам (лоткам) в потоке жидкости, как правило, воды. Для гидротранспорта могут применяться напорные и безнапорные установки, которые с успехом широко применяются в пищевой промышленности (мелкие составляющие могут помещаться в капсулы).

К достоинствам гидравлического транспорта относятся: высокая производительность и возможность транспортирования на большие расстояния без перегрузок; несложное оборудование; возможность совмещения транспортирования с технологическими процессами: герметичность трассы перемещения; отсутствие на трассе механического оборудования, за исключением ли-

нейных перекачивающих насосных станций; возможность полной автоматизации; невысокая трудоемкость; высокие экономические показатели.

Безнапорные установки, или гидравлические транспортеры (желоба) применяются для транспортирования огурцов, томатов, моркови, корнеплодов, гороха и других продуктов в смеси с водой к месту переработки из мест хранения. Для определения параметров дна и поперечного сечения желоба или открытого трубопровода необходимо учитывать характерные параметры транспортируемого материала: плотность, длину, ширину, толщину или эквивалентный диаметр продукта, коэффициент трения и состояние поверхности.

Однако несмотря на достаточную изученность характеристик плодов и овощей, коэффициентов трения качения и скольжения, в последнее время появились новые сорта продуктов с измененной структурой, плотностью и внешней поверхностью, поэтому необходимы дополнительные исследования и уточнения расчетных коэффициентов для практического применения, расчета и подбора элементов гидротранспорта.

Материалы и методы исследования. Параметры плодов, ягод, корнеклубнеплодов, овощей, рыбы, их размеры, плотность и насыпная плотность определялись с применением средств измерений (линейка, штангенциркуль), лабораторных весов и мерной емкости.

Твердость поверхности продукта является главным критерием при транспортировке, во избежание повреждения при всех соответствиях других показателей стандарту. Твердость H (Н/м^2) характеризует продукт по прочностным свойствам.

Измерение твердости продукции осуществляли при помощи прибора для измерения твердости органических сред (Ревякина–Горячкина). Подпружинный наконечник площадью S (м^2) с жесткостью пружины C (н/м) внедрялся на глубину h (м). По полученной диаграмме определяли твердость H (н/м^2):

$$H = Ch / S.$$

Данные приведены в табл. 1 [1].

Т а б л и ц а 1. Характеристика транспортируемого сырья по открытым системам

T a b l e 1. Characteristics of transported raw materials by open systems

Продукт Product	Размер продукта (длина, ширина, толщина или эквивалентный диаметр), мм Product size (length, width, thickness or equivalent diameter), mm	Плотность, кг/м^3 Density, kg/m^3	Насыпная масса, кг/м^3 Bulk weight, kg/m^3	Твердость поверхности, МПа Surface hardness, MPa
Горошек зеленый	Ø5–9	1050–1100	450–650	0,8–1,0
Огурец	Длина 30–140 Ø до 50	1020–1080	600–750	0,9–1,1
Картофель	Ø40–100	1100–1150	650–780	1,0–1,2
Морковь	Длина 60–160 Ø25–80	1070–1150	650	0,9–1,2
Рыба: мелкая; средняя; крупная	60 × 10 × 8 250 × 60 × 40 400 × 100 × 80	1050–1200	650–850	0,6–0,8
Свекла	Ø50–150	1100	650–780	1,0–1,3
Томаты	Ø30–80	1015–1030	585–780	0,8–1,0
Яблоки	Ø45–90	1030–1050	585–650	1,0–1,2
Клюква, голубика	Ø5–15	980–1012	400–600	0,85–1,1

Коэффициент трения скольжения $f_n = \text{tg } \alpha_n$ транспортируемого продукта по поверхностям, изготовленным из различных материалов, определяли на лабораторной экспериментальной установке, основными элементами которой являлись основание и исследуемая поверхность лотка, установленного под углом α к горизонту. Угол α для исследуемых элементов продукт–поверхность фиксировали угломером в момент начала движения продукта по поверхности. Полученные средние значения коэффициентов трения скольжения продуктов по сухой и смоченной поверхности материала приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Коэффициенты трения скольжения продукта по поверхности

T a b l e 2. Coefficients of sliding friction of the product on the surface

Продукт Product	Вид поверхности трения Type of friction surface											
	сталь оцинкованная galvanized steel		стекло рифленое corrugated glass		сталь нержавеющая stainless steel		лоток асбестоце- ментный asbestos-cement tray		сталь черная black steel		пластмасса plastic	
	сухая dry	смоченная wetted	сухая dry	смоченная wetted	сухая dry	смоченная wetted	сухая dry	смоченная wetted	сухая dry	смоченная wetted	сухая dry	смоченная wetted
Яблоко	0,404 0,466	0,344 0,364	0,268 0,306	0,213 0,249	0,488 0,532	0,364 0,404	0,424 0,445	0,325 0,344	0,287 0,364	0,231 0,287	0,466 0,488	0,268 0,325
Груша	0,424 0,488	0,306 0,325	0,325 0,364	0,268 0,287	0,445 0,488	0,325 0,364	0,727 0,839	0,466 0,51	0,424 0,466	0,364 0,404	0,424 0,466	0,268 0,306
Цитрусовые	0,325 0,364	0,268 0,287	0,268 0,306	0,231 0,249	0,268 0,325	0,231 0,268	0,344 0,364	0,268 0,325	0,268 0,325	0,213 0,268	0,325 0,364	0,213 0,268
Капуста	0,532 0,577	0,445 0,488	0,488 0,532	0,364 0,404	0,649 0,7	0,445 0,51	0,781 0,839	0,577 0,625	0,532 0,625	0,404 0,424	0,445 0,466	0,404 0,445
Огурец	0,781 0,839	0,532 0,625	0,532 0,577	0,577 0,7	0,577 0,625	0,532 0,577	0,649 0,7	0,7 0,839	0,781 0,839	0,649 0,7	0,675 0,7	0,488 0,532
Морковь	0,675 0,727	0,577 0,625	0,488 0,532	0,445 0,466	0,649 0,7	0,488 0,532	0,675 0,727	0,577 0,577	0,577 0,625	0,488 0,51	0,51 0,554	0,424 0,466
Картофель	0,51 0,554	0,445 0,466	0,532 0,577	0,51 0,532	0,532 0,577	0,445 0,488	0,7 0,754	0,625 0,625	0,532 0,577	0,445 0,466	0,466 0,577	0,466 0,51
Ягода												
Калина	0,466 0,51	0,424 0,466	0,424 0,466	0,404 0,445	0,466 0,488	0,384 0,424	0,839 0,9	0,7 0,727	6,7 0,781	0,554 0,625	0,532 0,577	0,466 0,51
Виноград	0,424 0,466	0,404 0,445	0,384 0,445	0,344 0,364	0,325 0,364	0,287 0,325	0,532 0,625	0,488 0,51	0,466 0,51	0,404 0,424	0,364 0,404	0,287 0,325

Результаты и их обсуждение. Полученные экспериментальные данные, характеристики овощного, плодового, ягодного сырья и рыбы: параметры (длина, ширина, толщина), плотность, насыпная масса, твердость поверхности и коэффициент трения скольжения являются основными, которые необходимы для расчета и проектирования гидравлических транспортных систем [2].

Гидравлический транспорт рассчитываем на основании уравнения неразрывности потока жидкости [2]

$$Q = Sv,$$

где Q – секундный расход жидкости (объем смеси (продукт + вода)), м³/с; S – площадь поперечного сечения потока, м²; v – скорость движения потока, м/с.

Секундный объем смеси, перемещаемой гидравлическим транспортером в открытом русле, можно определить по формуле [2]

$$Q = (W + q) / \rho,$$

где W – секундный расход воды, кг/с; q – секундный расход продукта, кг/с; ρ – удельная плотность гидросмеси, кг/м³; $\rho = 890\text{--}1130$ кг/м³. Формулу можно преобразовать

$$Q = \frac{q \left(\frac{W}{q} + 1 \right)}{\rho};$$

$$\rho = \frac{\rho_T + \rho_{ж}}{\rho_{ж}},$$

где ρ_T – плотность продукта, кг/м³; $\rho_{ж}$ – плотность воды, кг/м³.

Отношение $W / q = m$, показывающее, во сколько раз в смеси больше воды, чем транспортируемого продукта, назовем коэффициентом кратности.

Из уравнения Шези [2; 3]

$$v = C\sqrt{Ri},$$

уклон желоба

$$i = \frac{v^2}{C^2 R} \leq \operatorname{tg} \alpha,$$

где C – скоростной коэффициент, учитывающий сопротивления, возникающие при движении потока гидросмеси; R – гидравлический радиус, равный отношению площади залитого сечения желоба S к длине смоченного периметра P ; $R = S / P$; i – уклон желоба, м/м пог.

Расчет значений коэффициента C может быть проведен по формуле Маннинга [2]

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6},$$

где n – коэффициент шероховатости поверхности (табл. 3) [2].

Т а б л и ц а 3. Значения коэффициента шероховатости поверхности (n)

T a b l e 3. Values of the surface roughness coefficient (n)

Вид поверхности Surface type	Значение коэффициента Coefficient value
Обстроганные доски, хорошо пригнанные	0,009
Цементная поверхность	0,010
Бетонная поверхность	0,011
Нестроганные доски	0,012
Тесовая кладка, хорошая кирпичная кладка	0,013
Кирпичная кладка, бетонировка	0,014–0,015
Старая кирпичная или бутовая кладка	0,017–0,020
Поверхность, покрытая пластмассой	0,007–0,008

На основании проведенных исследований показателей коэффициентов трения и согласно формулам расчета получены и приведены в табл. 4 рекомендуемые данные для определения параметров открытых лотков гидротранспорта: гидравлического уклона, величины кратности расхода воды для различных видов транспортируемого сырья и скорости движения гидросмеси.

Т а б л и ц а 4. Рекомендуемые данные для расчета гидротранспорта

T a b l e 4. Recommended data for the calculation of hydraulic transport

Продукт Product	Уклон на участках, м/м Slope on sections, m/m		Коэффициент кратности расхода воды, кг/кг продукта Multiplicity factor of water consumption, kg/kg of product	Скорость движения гидросмеси в желобе, м/с The speed of movement of the slurry in the chute, m/s
	прямых straight lines	закругленных rounded		
Томаты, яблоки	0,008–0,01	0,012–0,015	3–5	0,7–0,8
Свекла и другие корнеплоды	Не менее 0,012	0,015–0,015	4–6	0,65–1,0
Зеленый горошек	0,01–0,015	0,015–0,02	3–5	Не менее 0,6
Рыба	0,01–0,02	0,015–0,025	6–8	0,5–2,0

Уклон желобов для транспортировки корнеплодов, ягод, овощей может составлять 8–12 мм на 1 пог. метр длины транспортера.

Для нормальной эксплуатации гидравлических транспортеров радиусы закруглений должны быть не меньше 2,5–3,0 м, а расчетный уклон желоба должен точно выдерживаться по всей длине транспортера. Кроме того, воду в гидравлический транспортер следует подавать с определенной скоростью, обеспечивающей скорость движения гидросмеси в желобе. Дно желоба транспортера необходимо расположить на 200 мм выше уровня воды в моечной машине. В условиях консервных заводов ширина русла гидравлического транспортера может быть 180–400 мм, глубина – 350–700 мм.

Принципиальная схема установки безнапорного гидротранспорта показана на рисунке. Основными ее элементами являются гидротранспортер 3 в виде лотка, желоба или канала, устройство 2 для загрузки твердого материала в гидротранспортер, водопровод для подачи обратной воды от емкости 5 через фильтр 6 с помощью центробежного насоса в головную часть гидротранспортера и приемного устройства 4, в котором вода отделяется от твердого материала [4].

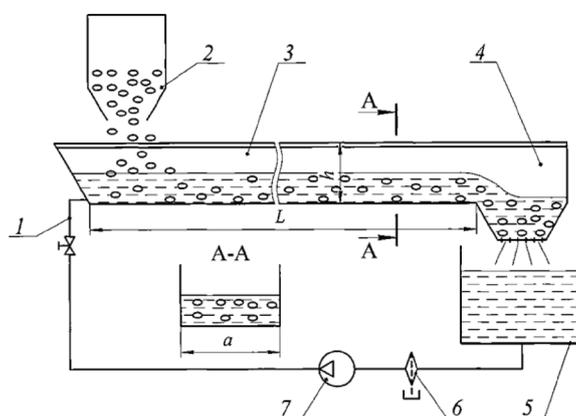


Схема установки безнапорного гидротранспорта
Scheme of installation of non-pressurized hydraulic transport

Такого типа установки широко применяются на свеклосахарных заводах для подачи свеклы, на картофелеперерабатывающих заводах для подачи картофеля, на консервных заводах для транспортирования моркови, помидор, яблок и т. п. Гидравлическими транспортерами на свеклосахарных заводах свекла перемещается с кагатных полей к главному корпусу сахарного завода. Гидравлический транспортер состоит из полевых, сборных и главных гидравлических транспортеров. Полевые лотки перекрывают специальными щитами, на которые укладывают кагаты свеклы. Под каждым кагатом обычно расположен один лоток. Полевые лотки сопрягаются со сборными уступом высотой 300–500 мм для предотвращения затопления водой неработающих полевых лотков.

Уклон желоба должен обеспечить движение в нем гидросмеси со скоростью не менее 1 м/с. Весовая консистенция смеси, как показал опыт эксплуатации установок, должна составлять (1 : 4)–(1 : 7) (свекла–вода).

Для предотвращения затопления неработающих желобов водой из магистрального канала боковые желоба сопрягаются с магистральным уступом высотой 300–500 мм, имеющим вид небольшого быстрого тока.

Обычно принимаются желоба с закругленными углами прямоугольного сечения. Во избежание закупорки желоба свеклой ширина его принимается не менее $a = 350$ мм.

Широко применяется также безнапорное гидротранспортирование при подаче картофеля с буртового поля в цеха картофелеперерабатывающих и крахмальных заводов. Гидротранспортеры в этом случае могут быть как одиночными, так и групповыми.

Уклон желоба на прямых участках должен составлять $i = 0,008–0,012$, а на закруглениях $i = 0,01–0,015$ мм. Радиусы закруглений принимаются не менее $R > 3$ м.

Желоба изготавливают прямоугольного сечения с плинтусами, доски с внутренней стороны тщательно остругивают и соединяют в шпунт или в четверть. Бетонные и кирпичные желоба штукатурят цементным раствором и гладко затирают. Бетонные желоба чаще всего изготавливают прямоугольного сечения с полукруглым или плоским основанием. Так как нижняя часть их часто засоряется, рекомендуется выполнять желоба прямоугольного сечения с округленными углами.

Металлические желоба изготавливают из листовой стали толщиной 4–5 мм и, как правило, прямоугольного сечения с полукруглым или плоским основанием и округленными углами. Ширина желоба при гидротранспортировании картофеля должна быть не менее $a = 180$ мм, высота берется равной двойной ширине желоба.

На некоторых заводах применяется безнапорное гидротранспортирование жома в металлических или цементных лотках. Уклон лотков при этом принимается равным $i = 0,06–0,08$, а консистенция смеси 1 : 2.

Корнеплоды подаются в лотки после подрыва щитов частично самотеком (15–25 %), бульдозером, тракторной лопатой, а также конвейерным свеклоподавателем.

Для обеспечения равномерной подачи свеклы применяются регуляторы, представляющие собой колеса-турникеты, пропускающие воду, но задерживающие излишки свеклы сверх требуемого количества для нормального хода процесса на заводе. Для прекращения подачи свеклы в лотках устанавливаются решетчатые затворы, а для улавливания камней, песка, мусора и т. д. устанавливаются камнеловушки и солоمولовушки, принцип действия которых основан на гидравлическом разделении смеси на фракции по удельному весу.

Применяется также гидравлический способ разгрузки свеклы из вагонов. Под действием сильной водяной струи свекла с потоком воды поступает в гидротранспортер, расположенный рядом с вагоном.

В практике гидротранспортирования могут применяться разнообразные схемы установок, любая установка обязательно будет состоять из устройства для приготовления и подачи гидро-смеси, устройства по созданию напора, под воздействием которого гидросмесь должна перемещаться по желобу, и самого гидравлического транспортера [4].

Заключение. По результатам экспериментальных исследований получены новые данные о характеристиках картофеля, плодов, ягод и овощей; прочности поверхности; коэффициентов трения качения и скольжения, на основании которых с использованием гидравлических расчетов приведены рекомендуемые данные для определения параметров гидротранспорта.

Список используемых источников

1. Ловкис, З. В. Необходимость введения дополнительного показателя качества для огурцов маринованных / З. В. Ловкис, С. А. Арнаут // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2011. – № 4 (14). – С. 86–91.
2. Ловкис, З. В. Гидравлика / З. В. Ловкис. – Минск, 2012. – 439 с.
3. Ловкис, З. В. Гидравлика / З. В. Ловкис, Б. А. Карташов, П. В. Лаврухин. – Ростов н/Д, 2019. – 383 с.
4. Ловкис, З. В. Исследование и расчет безнапорного гидротранспорта плодоовощного сырья / З. В. Ловкис, В. В. Чуешков // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2012. – № 2 (16). – С. 50–55.

References

1. Lovkis Z. V., Arnaut S. A. The Necessity of introducing additional indicator of quality for pickled cucumbers. *Pishchevaya promyshlennost': nauka i tekhnologii = Food industry: science and technology*, 2011, no. 4 (14), pp. 86–91 (in Russian).
2. Lovkis Z. V. *Hydraulics*. Minsk, 2012. 439 p. (in Russian).
3. Lovkis Z. V., Kartashov B. A., Lavrukhin P. V. *Hydraulics*. Rostov on Don, 2019. 383 p. (in Russian).
4. Lovkis Z. V., Chueshkov V. V. Research and calculation of unpressure head hydrotransport fruit and vegetable raw materials. *Pishchevaya promyshlennost': nauka i tekhnologii = Food industry: science and technology*, 2012, no. 2 (16), pp. 50–55 (in Russian).

Информация об авторе

Ловкис Зенон Валентинович – академик, д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по продовольствию (ул. Козлова, 29, 220037, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lovki_zv@mail.ru.

Information about the author

Lovkis Zenon V. – Academician, D. Sc. (Engineering), Professor, Chief Researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Food (29, Kozlov Str., 220037, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lovki_zv@mail.ru.