

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

2023. Т. 67. № 6

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

В. Л. Гурский

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

А. В. Кильчевский

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

С. А. Чижик

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

Т. П. Петрович

(ведущий редактор журнала)

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

Т. И. Адуло, Институт философии Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

В. В. Азаренко, Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

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

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

М. А. Богдасаров, Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина, Республика Беларусь

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

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

А. А. Волчек, Брестский государственный технический университет, Республика Беларусь

С. В. Гапоненко, Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь

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

А. Е. Дайнеко, Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований, Республика Беларусь

Н. Желев, 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**, Национальная академия наук Беларуси, Республика Беларусь
Н. Н. Казанский, Институт лингвистических исследований Российской академии наук, Российская Федерация
И. А. Карпов, Белорусский государственный медицинский университет, Республика Беларусь
С. П. Карпов, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Российская Федерация
А. А. Коваленя, Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
Э. И. Коломиец, Государственное научно-производственное объединение «Химический синтез и биотехнологии», Республика Беларусь
В. В. Лапа, Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
М. Ларссон, Университетский научный центр Алба Нова Стокгольмского университета, Королевство Швеция
А. П. Ласковнев, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
В. Г. Левашкевич, Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
Н. М. Литвинко, Президиум Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
В. Ф. Логиннов, Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
П. С. Лопух, Белорусский государственный университет, Республика Беларусь
В. К. Лукашевич, Институт философии Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
С. А. Лысенко, Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
Г. Маркрам, Институт мозга, Центр неврологии и технологии Швейцарского федерального института технологий, Швейцарская Конфедерация
А. А. Махнач, Институт геологии Научно-производственного центра по 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. П. Русак, Институт языкознания имени Якуба Коласа Центра исследований белорусской культуры, языка и литературы Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
И. В. Саверченко, Институт литературоведения имени Янки Купалы Центра исследований белорусской культуры, языка и литературы Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
В. А. Садовничий, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Российская Федерация
В. Г. Сафонов, Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
Н. В. Смехович, Институт истории Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
Д. В. Тапальский, Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
А. В. Тузиков, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь
Тъяу 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
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. № 6

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор Т. П. Петрович
Компьютерная верстка Л. И. Кудерко

Сдано в набор 05.12.2023. Выпуск в свет 27.12.2023. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 132 экз. Заказ 277.

Цена: индивидуальная подписка – 12,80 руб.; ведомственная подписка – 29,91 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. 6

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, Minsk, Belarus

Editorial Board

Sergey A. Chizhik

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

Vasily L. Gursky

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

Alexander V. Kilchevsky

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

Tatiana P. Petrovich

(Lead Editor)

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

Tadeouch I. Adoulo, Institute of Philosophy of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

Vladimir V. Azarenko, Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

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

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

Maxim A. Bogdasarov, Brest State A. Pushkin University, Republic of Belarus

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

Alexey Ye. Dayneko, Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, Republic of Belarus

Sergey V. Gaponenko, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

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

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

Igor A. Karpov, Belarusian State Medical University, Republic of Belarus

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

Nikolay S. Kazak, National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

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

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

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 G. Levashkevich, Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Nataliya M. Litvinko, Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Vladimir F. Loginov, Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Petr S. Lopukh, Belarusian State University, Republic of Belarus
Vladimir K. Lukashevich, Institute of Philosophy of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Sergey A. Lysenko, Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Anatoly A. Makhnach, Institute of Geology, Republic of Belarus
Henry Markram, Brain Institute, Center for Neurology and Technology of the Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland
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
Valentina P. Rusak, Institute of Linguistics named after Yakub Kolas of the Center for Research of Belarusian Culture, Language and Literature of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Viktor A. Sadovnichiy, Lomonosov Moscow State University, Russian Federation
Vasily G. Safonov, Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Ivan V. Saverchenko, Institute of Literary Studies named after Yanka Kupala of the Center for Research of Belarusian Culture, Language and Literature of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Sergey S. Shcherbakov, Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Ivan P. Sheyko, Scientific and Practical Center for Animal Breeding, Republic of Belarus
Alexander G. Shumilin, Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Nikolay V. Smekhovich, Institute of History of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Dmitry V. Tapalski, Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Alexander V. Tuzikov, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Sergey A. Usanov, Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Petr A. Vityaz, Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Aliaksandr A. Volchak, Brest State Technical University, Republic of Belarus
Igor D. Volotovskiy, Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Vitali G. Zaleski, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Anton Zeilinger, Austrian Academy of Sciences, Austria
Nikolas Zhelev, Abertay University, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland

Address of the Editorial Office:

*1, Akademicheskaya Str., room 119, 220072, Minsk, Republic of Belarus.
Phone: +375 17 272-19-19; e-mail: doklady_nanb@mail.ru
doklady.belnauka.by*

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS. 2023. Vol. 67. No. 6

Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor T. P. Petrovich
Computer Imposition L. I. Kudzerko

Sent for press 05.12.2023. Output 27.12.2023. Format 60×84¹/₈. Offset paper.
Digital press. Printed sheets 10.23. Publisher's signatures 11.3. Circulation 132 copies. Order 277.

Price: individual subscription – 12.80 BYN, departmental subscription – 29.91 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

К 95-ЛЕТИЮ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

- Коваленя А. А.** Белорусское гуманитарное знание в XXI столетии..... 447

МАТЕМАТИКА

- Матус П. П., Пылак Д.** Безусловно монотонная и глобально устойчивая разностная схема для уравнения Фишера..... 454
Сафонова И. Н., Скиба А. Н. О некоторых классах конечных σ -разрешимых $P\sigma T$ -групп (на англ. яз.) ... 460

ХИМИЯ

- Солдатов В. С., Косандрович Е. Г., Безъязычная Т. В.** Аномальное набухание в воде карбоксильного ионита в формах ионов аммония и тетраэтиламмония 465
Буча С. В., Воробьёв А. Д., Чердниченко Д. В., Воробьёва Е. В., Лаевская Е. В., Крутько Н. П., Бондарева Г. В. Влияние бинарной системы на основе неионогенного поверхностно-активного вещества и анионного полиэлектролита на устойчивость дисперсии карбонатов кальция и магния..... 473

БИОЛОГИЯ

- Канунникова Н. П., Семенович Д. С., Катковская И. Н., Титко О. В., Лукиенко Е. П., Гуринович В. А., Мойсеёнок А. Г.** Моделирование редокс-дисбаланса и окислительного стресса в гиппокампе при алюминиевом нейротоксикозе и иницировании биосинтеза кофермента А 481

МЕДИЦИНА

- Галицкая В. Ю., Потапнев М. П., Асаевич В. И., Богдан В. Г., Космачева С. М., Карпенко Ф. Н.** Тромбоцитарный гель и факторы, определяющие его биологические характеристики..... 490

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Лысенко С. А., Логинов В. Ф.** Пространственно-временная когерентность квазипериодических компонент метеорологических полей как основа долгосрочных прогнозов погоды 499

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Демиденко О. Ф., Желудкевич А. Л., Ларин А. О., Говор Г. А., Сунь Хайбо, Чен Дунчу, Янкевич С. Н.** Структура, электромагнитные свойства Fe-содержащих магнитных композитов и их практическое применение (на англ. яз.)..... 508

АГРАРНЫЕ НАУКИ

- Казакевич П. П., Тимошенко В. Н., Музыка А. А., Кирикович С. А., Шейграцова Л. Н., Пучка М. П., Шматко Н. Н., Тимошенко М. В., Конёк А. И.** Оценка производственных процессов на наиболее типичных фермах и комплексах по производству молока 517

CONTENTS

TO THE 95TH ANNIVERSARY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

Kavalenia A. A. Belarusian humanitarian knowledge in the XXI century	447
---	-----

MATHEMATICS

Matus P. P., Pylak D. Unconditionally monotone and globally stable difference schemes for the Fisher equation.....	454
Safonova I. N., Skiba A. N. On some classes of finite σ -soluble $P\sigma T$ -groups.....	460

CHEMISTRY

Soldatov V. S., Kosandrovich E. G., Bezyazychnaya T. V. Abnormal swelling in water of carboxylic ion exchanger in the forms of ammonium and tetraethylammonium ions	465
Bucha S. V., Vorobiev A. D., Cherednichenko D. V., Vorobieva E. V., Laevskaya E. V., Krutko N. P., Bondareva H. V. Effect of a nonionic surfactant and anionic polyelectrolyte binary system on the stability of a calcium and magnesium carbonates dispersion	473

BIOLOGY

Kanunnikova N. P., Semenovich D. S., Katkovskaya I. N., Titko O. V., Lukiyenko E. P., Gurinovich V. A., Moiseenok A. G. Modelling the redox imbalance and oxidative stress in the hippocampus at aluminum neurotoxicity and initiating the coenzyme A biosynthesis	481
---	-----

MEDICINE

Galitskaya V. Yu., Potapnev M. P., Asaevich V. I., Bogdan V. G., Kosmacheva S. M., Karpenko F. N. Platelet gel and factors determining its biological activity.....	490
--	-----

EARTH SCIENCES

Lysenko S. A., Loginov V. F. Spatial and temporal coherence of quasi-periodic components of meteorological fields as a basis for long-term weather forecasts	499
---	-----

TECHNICAL SCIENCES

Demidenko O. F., Zhaludkevich A. L., Laryn A. O., Govor G. A., Sun Haibo, Chen Dongchu, Yankevich S. N. Structure, soft magnetic properties of Fe-based magnetic composites and its practical application.....	508
---	-----

AGRARIAN SCIENCES

Kazakevich P. P., Tsimoshanka U. N., Muzyka A. A., Kirikovich S. A., Sheigratsova L. N., Puchka M. P., Shmatko N. N., Tsimoshanka M. V., Konek A. I. Assessing the production processes on the most typical farms and milk production complexes	517
--	-----

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

К 95-ЛЕТИЮ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ
TO THE 95TH ANNIVERSARY OF THE NATIONAL ACADEMY
OF SCIENCES OF BELARUS

УДК 001.32:[1/3+7/9](476)''20''
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-447-453>

Поступило в редакцию 01.12.2023
Received 01.12.2023

Академик А. А. Коваленя

*Отделение гуманитарных наук и искусств Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

БЕЛОРУССКОЕ ГУМАНИТАРНОЕ ЗНАНИЕ В XXI СТОЛЕТИИ

Аннотация. Показаны достижения Отделения гуманитарных наук и искусств НАН Беларуси в начале XXI столетия.

Ключевые слова: история, гуманитарная наука, лингвистика, литературоведение, философия

Для цитирования. Коваленя, А. А. Белорусское гуманитарное знание в XXI столетии / А. А. Коваленя // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 6. – С. 447–453. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-447-453>

Academician Aliaksandr A. Kavalenia

*Department of Humanitarian Sciences and Arts of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

BELARUSIAN HUMANITARIAN KNOWLEDGE IN THE XXI CENTURY

Abstract. The article shows the achievements of the Department of Humanitarian Sciences and Arts of the National Academy of Sciences of Belarus at the beginning of the 21st century.

Keywords: history, humanities, linguistics, literary criticism, philosophy

For citation. Kavalenia A. A. Belarusian humanitarian knowledge in the XXI century. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 6, pp. 447–453 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-447-453>

Исторический опыт убедительно свидетельствует о том, что основой развития общества, его важнейшей движущей силой является человек, вооруженный научно-техническими достижениями. Общеизвестно, что никакие материальные структуры, политические институты и идеи без деятельности людей, сами по себе не представляют общественной ценности. Именно благодаря вдумчивому использованию накопленного опыта и интеллектуальному развитию человека происходят постоянные научные открытия, влияющие не только на развитие научно-технического прогресса, но и на социальную эволюцию человека, а также структурные преобразования общественного образа жизни. Мы даже не обращаем внимания на тот факт, что огромное количество людей являются потребителями и пользователями современных сложных технических устройств, ставших практическим результатом развития науки.

Не стоят в стороне и ученые белорусской академической науки. 13 октября 2023 года Национальная академия наук Беларуси отметила 95-летний юбилей. По историческим меркам это научное младенчество, но и за этот период белорусские ученые внесли достойный вклад в общественно-политическое, социально-экономическое и духовно-культурное развитие белорусского

общества. Сегодня НАН Беларуси – это научно-производственная корпорация, объединяющая более 100 организаций, из них около 70 имеют статус научных. В Академии наук работает около 14 тысяч человек, средний возраст которых составляет 48,4 лет. Среди них – 7103 человека заняты научными исследованиями и разработками, в том числе 336 докторов наук и 1501 кандидат наук.

Национальная академия наук Беларуси является высшей государственной научной организацией нашей страны, подчиняется Президенту и подотчетна Совету Министров Республики Беларусь. Ученые Академии наук осуществляют организацию и координацию научных исследований, которые выполняются в стране, проводят фундаментальные и прикладные научные исследования, внедряют разработки по важнейшим направлениям естественных, технических, медицинских и социально-гуманитарных наук. В структуре НАН Беларуси успешно работают семь отделений наук: Отделение физики, математики и информатики, Отделение физико-технических наук, Отделение химии и наук о Земле, Отделение биологических наук, Отделение медицинских наук, Отделение гуманитарных наук и искусств и Отделение аграрных наук.

Известно, что главная цель познания – получить практический, зачастую жизненно важный результат, при этом в обществе всегда присутствовали человекоориентированные науки. Вспомним академию, основанную Платоном вблизи Афин еще в 380-х годах до н. э., которая стала прообразом последующих академий наук и университетов. В этой академии уже в то время обсуждались проблемы естествознания и философии с целью морального и интеллектуального усовершенствования человека и общества. Именно проблемы развития человека и общества всегда являлись предметом исследования ученых-гуманитариев.

К этому следует добавить, что в начале XXI столетия человечество достигло невероятных научно-технологических успехов. Не является секретом тот факт, что компьютерные технологии, мобильный телефон, цифровое телевидение, робототехника и искусственный интеллект стали обыденностью в жизни людей. Уже сегодня становится очевидным и архиважным, чтобы опережающее развитие научно-технического прогресса, материальные ценности и прибыль не превышали здравый смысл потребностей человека и были уравновешены и духовно-мировоззренческим благополучием людей. Иначе мы сформируем нового человека, у которого нет ни души, ни чести, ни совести. Вспомним события общественной жизни в СССР в 1980–1990 гг., когда информационное пространство заполнили «смехопанорамы», всячески критиковавшие и пародировавшие советский образ жизни. Делалось многое, что содействовало развалу великой страны. Сегодня архиважно, чтобы в обществе культивировались и пропагандировались ценности созидания, которые формируют ответственное отношение к людям и окружающей природе. Важно сохранять и приумножать ценности взаимоуважения и взаимовыручки, особенно традиционные народные ценности и идеи, способные пробудить жизненные силы в народе.

Эти и другие сложнейшие духовно-мировоззренческие задачи сегодня призваны решать ученые Отделения гуманитарных наук и искусств Национальной академии наук Беларуси. Отделение объединяет ряд государственных научных учреждений: Центр исследований белорусской культуры, языка и литературы, Центр системного анализа и стратегических исследований, Институт истории, Институт социологии, Институт философии, Институт экономики, а также Университет Национальной академии наук Беларуси, Центральную научную библиотеку имени Якуба Коласа, Издательский дом «Беларуская навука», книготорговое республиканское унитарное предприятие «Академическая книга».

Ученые-гуманитарии способны не только давать научную и экспертную оценку, прогнозировать риски социально-экономического и социально-политического развития, но и находить пути их нивелирования и преодоления. Необходимо обратить внимание на тот факт, что в первые десятилетия XXI столетия, благодаря государственному вниманию и поддержке Президента А. Г. Лукашенко, мы наблюдаем не просто значительное увеличение числа исследований гуманитариев, но и, я бы сказал, ренессанс гуманитарного знания в Республике Беларусь. Особенностью организации научной работы ученых-гуманитариев нашей страны является то, что мы начиная с 2011 г. осуществляем научные исследования в рамках единых общегосударственных программ. В 2021–2025 гг. выполняется программа «Общество и гуманитарная безопасность бе-

лорусского государства», включающая 8 подпрограмм: «История», «Философия», «Экономика», «Социология», «Право», «Культура и искусство», «Белорусский язык и литература», «Образование», которые объединяют 54 задания, составляющие научное содержание исследований.

Каждую подпрограмму возглавляют высококвалифицированные ученые, осуществляющие их координацию. Например, подпрограмму «Право» возглавляет доктор юридических наук, профессор Оксана Николаевна Здрок. В подпрограмму включено шесть базовых заданий, выполняемых специалистами учреждений образования и государственных органов. Среди них – Белорусский государственный университет, Академия управления при Президенте Республики Беларусь, Национальный центр законодательства и правовых исследований Беларуси, Научно-практический центр проблем укрепления законности и правопорядка Генеральной прокуратуры Беларуси, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Полоцкий государственный университет, Белорусский государственный экономический университет и др.

Головной организацией по программе, осуществляющей необходимую организационную работу, является Институт истории НАН Беларуси. Сегодня в реализации программы задействовано 2016 исследователей из 46 научных организаций НАН Беларуси и высших учебных заведений страны. Среди исполнителей программы 8 академиков, 9 членов-корреспондентов Национальной академии наук Беларуси, 220 докторов наук и 858 кандидатов наук. Научное руководство программой осуществляет совет, в который входят руководители подпрограмм во главе с академиком А. А. Коваленей. Такая организационная форма научных исследований в нашей стране способствует укреплению сотрудничества ученых-гуманитариев и позволяет объединить творческие усилия ученых, активизировать исследовательскую работу и получить значительные качественные и количественные результаты.

Так, в 2022 г. ученые Отделения опубликовали почти 2100 научных работ, в том числе 134 книжных издания, из них 44 монографии, 29 сборников, 9 справочников и энциклопедий, 2 учебника. Подготовлено и опубликовано свыше 1500 научных статей и докладов, более 430 тезисов докладов. В ходе реализации госпрограммы исследователями установлено 9 закономерностей и 8 новых зависимостей, разработано 20 новых методов и 1 макет-система; проведено более 70 научных конференций и круглых столов.

Следует обратить внимание на наиболее значимые достижения ученых Отделения гуманитарных наук и искусств, получившие широкий резонанс в белорусском обществе и высокую оценку научной общественности в начале XXI столетия. В этом ряду необходимо назвать «Гістарычны слоўнік беларускай мовы» в 37 выпусках [1]. Масштабные исследования были осуществлены учеными Института языкознания имени Якуба Коласа с 1960 по 2022 г. Разработка концепции уникального издания осуществлялась под руководством членов-корреспондентов НАН Беларуси, докторов филологических наук А. И. Журавского и А. Н. Булыко. Практическая работа, направленная на успешную реализацию этого важного национального проекта, осуществлялась в два этапа. Первый – определение хронологических границ и источников исторического словаря, разработка принципов его написания, создание картотеки. Второй – лексикографическая обработка собранного материала.

Ученые-филологи на протяжении шести десятилетий осуществили масштабную научно-исследовательскую работу. Были изучены рукописные и печатные памятники XIV–XVIII вв. самых разных жанров, позволившие выявить особенности лексики древнего периода и огромное количество вариантов графического отображения слов. Благодаря таланту и упорному труду ученых-лингвистов в фундаментальном издании осуществлена детальная лексикографическая обработка более 75 тысяч слов, зафиксированных в грамотах, договорах, уставах, летописях, хрониках, хронографах, описаниях воинских сражений и рыцарских поединков, романах и повестях, мемуарных, публицистических, научных и религиозных произведениях. В результате целенаправленной и напряженной исследовательской работы многих поколений академических лингвистов был создан первый и единственный в мире историко-лингвистический справочник, который максимально полно отражает лексический состав белорусского языка XIV–XVIII вв.

и открывает широкие возможности для изучения орфографии, морфологии и синтаксиса белорусского языка.

Этот фундаментальный труд выступает надежным источником знаний не только о развитии белорусского языка, но и, что особенно важно, о прошлом белорусского народа, формировании белорусской нации и истории белорусской государственности. Например, подтверждено, что старобелорусский язык в период существования Великого Княжества Литовского играл роль государственного и выступал языком белорусской народности. Причем он использовался в делопроизводстве, судопроизводстве, при составлении дипломатических документов, сборников законов, в частности «Статутов Великого Княжества Литовского», при написании летописей и религиозных произведений. В издании содержатся богатейшие сведения о развитии материальной и духовной культуры, организации социально-экономической и общественно-политической жизни белорусского народа, происходившей на протяжении пяти столетий.

В результате исследований была создана уникальная рукописная картотека старобелорусской лексики, которая насчитывает более 1 060 000 карточек богатейшего фактического материала, отражающего сложный процесс развития и использования белорусского языка. Рукописная картотека старобелорусской лексики – это историко-культурное достояние не только Беларуси, но и всего славянского мира.

Несомненно, важным событием в жизни белорусского общества явилась подготовка и издание фундаментального труда «Беларусь» [2]. В 13 томах уникального издания обобщены результаты многочисленных полевых этнографических исследований, накопленных учеными Института искусствоведения, этнографии и фольклора им. К. Крапивы в XX в. Собранные в издании документальные материалы показывают особенности этнической среды, зодчества, демографических, конфессиональных, языковых и социальных процессов, этнического самосознания городского и сельского населения Беларуси.

Значительный общественный интерес вызвал выход четырехтомного издания «Гісторыя беларускай літаратуры XX стагоддзя» [3]. Исследование, уникальное по своей научной значимости, осуществлено учеными Института литературоведения им. Я. Купалы. В каждой книге представлены разделы поэзии, прозы, драматургии, критики и литературоведения. Персональные статьи описывают творчество крупных писателей, отражают не только индивидуально-авторские особенности, но и национальную специфику белорусской литературы в целом. Авторы стремились показать роль и значение литературы в углублении общественного сознания, воспитании у новых поколений патриотизма и гуманизма, показать потенциал и возможности белорусского художественного слова, его неповторимость и идейно-эстетическое богатство.

Гордостью отечественных гуманитариев является подготовка и издание 20 книг оригинального многотомного научного энциклопедического труда «Гарады і вёскі Беларусі» [4]. На основе богатейших архивных и опубликованных источников, собранных и обработанных учеными, в фундаментальном издании впервые в отечественной науке обобщен материал, который освещает важнейшие события истории и современного экономического и культурного развития всех административно-территориальных единиц Беларуси: 6 областей, 118 районов, – а также городов, поселков городского типа, агрогородков, деревень и хуторов страны со времени их основания и до наших дней, в том числе и тех населенных пунктов, которые уже перестали существовать.

Кропотливая научно-исследовательская работа над проектом продолжалась более 20 лет. В основу издания положены многочисленные сведения, выявленные в исторических архивах и научных библиотеках Минска, Гродно, Москвы, Санкт-Петербурга, Вильнюса, областных и зональных архивах страны. В издании широко использованы материалы комплексных исследований, полученные в результате экспедиций и командировок, а также материалы республиканских и местных музеев. Руководителем авторского коллектива и научным редактором издания с 2004 г. является академик, директор Центра исследований белорусской культуры, языка и литературы НАН Беларуси А. И. Локотко.

Заметным событием в научной и общественно-политической жизни Беларуси явилось издание «Вялікага гістарычнага атласа Беларусі» в 4 томах [5] – оригинального и наиболее полного

научно-справочного картографического труда, в котором собрано более 400 уникальных карт. Работа над подготовкой атласа продолжалась более десяти лет. Благодаря колоссальным усилиям и профессионализму авторского коллектива, а это белорусские ученые-историки, лингвисты и картографы, создан настоящий национальный шедевр. Каждая страница атласа основана на первоисточниках, включая крупномасштабные карты отдельных территорий, планы городов, схемы знаковых сражений. Каждый том атласа дополнен общими картами, на которых показаны все значимые населенные пункты соответствующего времени и указана их принадлежность. Значение проекта для научной и культурной жизни нашей страны сложно переоценить. В данном издании обобщен опыт истории белорусского народа, картографическими средствами убедительно раскрыт процесс формирования белорусской государственности. Несомненно, это многотомное издание является визитной карточкой страны, помимо основных символов – герба, флага и гимна. Неслучайно, в 2018 г. «Вялікі гістарычны атлас Беларусі» был удостоен высшей награды в номинации «Триумф», а в 2020 г. – премии «За духовное возрождение».

Большое значение для суверенной Беларуси имеет исследовательская работа, направленная на научное обоснование истории белорусской государственности. Ученые Института истории Национальной академии наук Беларуси вместе с коллегами из вузов, опираясь на результаты многолетних исследований, подготовили и опубликовали уникальное издание – «История белорусской государственности» [6].

В процессе научных поисков и подготовки данного труда авторский коллектив основательно исследовал проблему формирования белорусского этноса, провел тщательное изучение и определил его место и роль в государственных образованиях, в составе которых находились белорусские земли до реального оформления собственной национальной государственности. Проведена большая исследовательская работа, каждый том посвящен анализу истории белорусской государственности на том или ином этапе ее развития.

Идеология белорусской государственности базируется на понимании исторического происхождения белорусского этноса, незыблемости права белорусского народа на осуществление собственной национальной государственности. Несомненно, наши предки участвовали в создании Полоцкого и Туровского, а также других княжеств, входивших в состав Киевской Руси, Великого Княжества Литовского, Речи Посполитой, Российской империи и Советского Союза. В каждом томе «Истории белорусской государственности» зафиксированы ключевые события, которые оказали наибольшее влияние на формирование и развитие белорусской государственности на протяжении многих столетий.

В Национальной академии наук во исполнение Указа Президента Республики Беларусь от 9 марта 2017 г. № 72 «О подготовке и выпуске научно-популярного печатного издания» было подготовлено уникальное издание «Республика Беларусь – 25 лет созидания и свершений» в 7 томах [7]. Это крупнейший научно-издательский проект в новейшей истории нашей страны. В нем представлено более ста тем, которые отражают достижения белорусского народа за 25 лет суверенного государственного строительства в общественно-политической, социально-экономической и духовно-культурной сфере. В подготовке этого проекта было задействовано более 400 авторов из числа известных в стране и за рубежом ученых и государственных служащих, а в качестве рецензентов и консультантов привлечены высшие должностные лица и руководители государственных органов. В издании показана созидательная деятельность, творческие свершения и достижения белорусского народа за 25 лет независимого развития Беларуси. Глубокий научный анализ и осмысление опыта строительства суверенной страны позволят извлечь необходимые уроки, убедиться в правильности избранного пути с целью дальнейшего укрепления национальной государственности.

Немаловажным событием в духовно-культурной жизни белорусского общества явилась подготовка фундаментального труда, раскрывающего историческую мудрость белорусского народа, – «Гісторыя філасофскай і грамадска-палітычнай думкі Беларусі» в 6 томах (издано 4 тома) [8]. Академические ученые-философы предложили не только концептуальную модель развития белорусской философской и общественно-политической мысли, но и убедительно показали своеобра-

зие и неповторимость отечественной интеллектуальной культуры в сравнении с западными и восточными традициями.

Названные научные проекты составляют только небольшую часть масштабной научно-исследовательской работы ученых-гуманитариев Республики Беларусь. Представляется, что не только сегодня, но и в будущем гуманитарные знания будут играть чрезвычайно важную роль в государственной системе образования и воспитания подрастающего поколения. Гуманитарные знания являются основой всего образовательного процесса, они позволяют сформировать не узкоспециализированного профессионала, а человека с широким гуманистическим взглядом на природу, общество. Гуманитарные знания должны способствовать преодолению унификации и стандартизации не только промышленного производства и продукции, но и, что особенно важно, мировоззрений и ценностей человека. Именно такой подход может спасти нас от цивилизованного варварства, где бы оно ни проявлялось: в политике, экономике, международных отношениях, экологии, средствах массовой культуры.

Известно, что научно-технический прогресс значительно опережает духовное и культурное развитие человека. Точные науки и основанная на них техника достигли поистине гигантских успехов, человечеству становится все сложнее осознавать и оценивать последствия этого прогресса. Сегодня многие исследователи-гуманитарии, политики и общественные деятели поднимают вопросы развития гуманитарного знания, его практического вовлечения в общественно-политическую действительность. Особое место занимают духовно-нравственные ценности человека, которые являются своеобразным стержнем нашего внутреннего мира. Необходимо, чтобы гуманитарное, духовно-нравственное, ценностное формирование личности и общества носило опережающий характер.

Краткий обзор достижений белорусских гуманитариев убедительно свидетельствует о том, что в начале XXI столетия создан необходимый фундамент для дальнейшего развития гуманитарных исследований в Республике Беларусь, что подтверждает высокий статус белорусской гуманитарной науки. Сегодня ученые Отделения гуманитарных наук и искусств стремятся исследовать и внедрять в общественное сознание идеологические установки, которые ставят на первое место духовные, а не материальные ценности, и предлагают опираться на научные достижения, способствующие полноценному развитию человека-творца, стремящегося к добру и неутолимой жажде правды.

Список использованных источников

1. Гістарычны слоўнік беларускай мовы: у 37 вып. / Нац. акад. навук Беларусі, Ін-т мовазнаўства імя Я. Коласа; пад рэд. А. М. Булькі, А. І. Жураўскага. – Мінск, 1982–2017.
2. Беларусы: у 13 т. / АН Беларусі, Ін-т мастацтвазнаўства, этнаграфіі і фальклору; рэдкал.: В. К. Бандарчык, М. Ф. Піліпенка, А. І. Лакотка [і інш.]. – Мінск, 1995–2009.
3. Гісторыя беларускай літаратуры XX стагоддзя: у 4 т. / Нац. акад. навук Беларусі, Ін-т мовы і літаратуры імя Якуба Коласа і Янкі Купалы. – Мінск, 1999–2003.
4. Гароды і вёскі Беларусі: энцыкл.: у 10 т. / Нац. акад. навук Беларусі; Цэнтр даслед. Беларус. культ., мовы і літ.; Беларус. энцыкл. імя П. Броўкі; рэдкал.: У. У. Андрыевіч (гал. рэд.) [і інш.]. – Мінск, 2004–2021.
5. Вялікі гістарычны атлас Беларусі: у 4 т. / Дзярж. камітэт па маёмасці Рэспублікі Беларусь; Рэсп. унітарнае прадпрыемства «Белкартаграфія». – Мінск, 2008–2018.
6. История белорусской государственности: в 5 т. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т истории; А. А. Коваленя [и др.]. – Минск, 2018–2019.
7. Республика Беларусь – 25 лет созидания и свершений: в 7 т. / редсовет: В. П. Андрейченко [и др.]. – Минск, 2020.
8. Гісторыя філасофскай і грамадска-палітычнай думкі Беларусі: у 6 т. / Нац. акад. навук Беларусі, Ін-т філасофіі. – Мінск, 2008–2017. – Т. 1–4.

References

1. Bulyka A. M., Zhuravski A. I., eds. *Historical Dictionary of the Belarusian language in 37 vol.* Minsk, 1982–2017 (in Belarussian).
2. Bandarchyk V. K., Pilipenko M. F., Lakotka A. I. [et al.], eds. *Belarusians in 13 vol.* Minsk, 1995–2009 (in Belarussian).
3. *History of the Belarusian literature of the XX century in 4 vol.* Minsk, 1999–2003 (in Belarussian).
4. Andryevich U. U. [et al.], eds. *Towns and Villages of Belarus in 10 vol.* Minsk, 2004–2021 (in Belarussian).

5. *Great Historical Atlas of Belarus in 4 vol.* Minsk, 2008–2018 (in Belarussian).
6. Kovalenya A. A. [et al], eds. *History of the Belarusian Statehood in 5 vol.* Minsk, 2018–2019 (in Russian).
7. Andreichenko V. P. [et al.], eds. *Republic of Belarus – 25 years of Creation and Accomplishments in 7 vol.* Minsk, 2020 (in Russian).
8. *History of Philosophical and Socio-Political Thought of Belarus in 6 vol. Vol. 1–4.* Minsk, 2008–2017 (in Belarussian).

Информация об авторе

Коваленя Александр Александрович – академик, д-р ист. наук, профессор, академик-секретарь. Отделение гуманитарных наук и искусств НАН Беларуси (пр-т Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: humanity@presidium.bas-net.by.

Information about the author

Kavalenia Aliaksandr A. – Academician, D. Sc. (History), Professor, Academic Secretary. Department of Humanities Sciences and Arts of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nizavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: humanity@presidium.bas-net.by.

МАТЕМАТИКА**MATHEMATICS**

УДК 519.63

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-454-459>

Поступило в редакцию 10.04.2023

Received 10.04.2023

Член-корреспондент П. П. Матус^{1,2}, Д. Пылак²¹*Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*²*Католический университет Люблина, Люблин, Польша***БЕЗУСЛОВНО МОНОТОННАЯ И ГЛОБАЛЬНО УСТОЙЧИВАЯ
РАЗНОСТНАЯ СХЕМА ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ФИШЕРА**

Аннотация. В работе строятся и исследуются безусловно монотонные и глобально устойчивые разностные схемы для уравнения Фишера. Показано, что при определенном выборе входных данных задачи эти схемы наследуют главное свойство устойчивого решения дифференциальной задачи $0 \leq u(x, t) \leq 1$, $(x, t) \in \bar{Q}_T = \{(x, t) : 0 \leq x \leq l, 0 \leq t < +\infty\}$. Доказана безусловная монотонность рассматриваемых разностных схем и получена априорная оценка разностного решения в равномерной норме. Устойчивое поведение разностного решения в нелинейном случае имеет место при несколько более жестких ограничениях на входные данные: $0,5 \leq u_0(x)$, $\mu_1(t)$, $\mu_2(t) \leq 1$.

Ключевые слова: безусловная монотонность, глобальная устойчивость, разностная схема, уравнение Фишера

Для цитирования. Матус, П. П. Безусловно монотонная и глобально устойчивая разностная схема для уравнения Фишера / П. П. Матус, Д. Пылак // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 6. – С. 454–459. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-454-459>

Corresponding Member Piotr P. Matus^{1,2}, D. Pylak²¹*Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*²*Institute of Mathematics and Computer Science the John Paul II Catholic University of Lublin, Lublin, Poland***UNCONDITIONALLY MONOTONE AND GLOBALLY STABLE DIFFERENCE
SCHEMES FOR THE FISHER EQUATION**

Abstract. In this paper, we construct and study unconditionally monotone and globally stable difference schemes for the Fisher equation. It has been shown that constructed schemes inherit the stability property of the exact solution: $0 \leq u(x, t) \leq 1$, $(x, t) \in \bar{Q}_T = \{(x, t) : 0 \leq x \leq l, 0 \leq t < +\infty\}$ for a given input data of the problem. The unconditional monotonicity of the difference schemes is proved and the a priori estimate is obtained in the uniform norm for the difference solution. The stable behavior of the difference solution in the nonlinear case takes place under slightly more stringent constraints on the input data: $0,5 \leq u_0(x)$, $\mu_1(t)$, $\mu_2(t) \leq 1$.

Keywords: unconditional monotonicity, global stability, difference scheme, Fisher equation

For citation. Matus P. P., Pylak D. Unconditionally monotone and globally stable difference schemes for the Fisher equation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 6, pp. 454–459 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-454-459>

Введение. Популяционная модель Фишера, или Колмогорова–Петровского–Пискунова [1; 2] встречается в различных задачах, например, в теории горения, в теории фазовых переходов, в физике плазмы и др. Дифференциальные свойства решения задачи Коши для данного уравнения изучаются в [3]. Указывается класс входных данных задачи, для которых точное положительное решение не превосходит единицы для любого $0 < t < +\infty$. Естественно, для данной модели необходимо строить такие вычислительные методы, которые наследуют это свойство.

В данной работе строятся и исследуются безусловно монотонные и глобально устойчивые разностные схемы для уравнения Фишера. Показано, что при определенном выборе входных данных задачи эти схемы наследуют главное свойство устойчивого решения дифференциальной задачи: $0 \leq u(x, t) \leq 1$, $(x, t) \in \bar{Q}_T = \{(x, t) : 0 \leq x \leq l, 0 \leq t < +\infty\}$. Доказана безусловная монотонность рассматриваемых разностных схем и получена априорная оценка разностного решения в равномерной норме. Устойчивое поведение разностного решения в нелинейном случае имеет место при несколько более жестких ограничениях на входные данные: $0, 5 \leq u_0(x)$, $\mu_1(t)$, $\mu_2(t) \leq 1$.

Двусторонние оценки. В дальнейшем нам понадобится нестандартный принцип максимума для общей канонической формы записи разностных схем [4], позволяющий устанавливать двусторонние оценки разностного решения для нелинейных задач [5]. Пусть задано начальное число точек-сетка $\bar{\omega}_h = \omega_h \cup \gamma_h$, где ω_h – множество внутренних точек; γ_h – множество граничных узлов. Окрестностью точки x называется множество $M'(x) = M(x) \setminus x$, $M(x)$ – шаблон. Пусть заданы функции $A(x)$, $B(x, \xi)$, $F(x)$, определенные при любых $x \in \omega_h$ и принимающие вещественные значения. Для каждой точки $x \in \omega_h$ сопоставим одно и только одно уравнение вида [4, с. 226]

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

называемое канонической формой записи разностной схемы. Для (1) в граничных узлах зададим условие Дирихле

$$y(x) = \mu(x), \quad x \in \gamma_h. \tag{2}$$

Отметим, что при аппроксимации граничных условий второго или третьего рода сетка может не содержать граничных узлов. Будем предполагать выполнение обычных условий положительности коэффициентов

$$A(x) > 0, \quad B(x, \xi) > 0 \quad \text{для всех } \xi \in M'(x), \quad x \in \omega_h, \tag{3}$$

$$D(x) = A(x) - \sum_{\xi \in M'(x)} B(x, \xi) > 0 \quad \text{для всех } \xi \in M'(x), \quad x \in \omega_h, \tag{4}$$

гарантирующих однозначную разрешимость схемы в равномерной норме.

Сформулируем утверждение, позволяющее установить двусторонние оценки сеточного решения при незнакоопределенных входных данных задачи $\mu(x)$, $F(x)$.

Л е м м а. Пусть выполнены условия положительности коэффициентов (3), (4). Тогда максимальное и минимальное значения решения разностной схемы (1), (2) принадлежат интервалу изменения входных данных:

$$m_1 \leq y(x) \leq m_2, \quad x \in \bar{\omega}_h, \tag{5}$$

$$m_1 = \min \left\{ \min_{x \in \gamma_h} \mu(x), \min_{x \in \omega_h} \frac{F(x)}{D(x)} \right\}, \quad m_2 = \max \left\{ \max_{x \in \gamma_h} \mu(x), \max_{x \in \omega_h} \frac{F(x)}{D(x)} \right\}.$$

Доказательство этого утверждения можно найти в [5].

Определение монотонности разностной схемы в нелинейном случае. Возмущая в (1), (2) входные данные задачи $F(x)$, $\mu(x)$, получим возмущенную задачу

$$A(x)\tilde{y}(x) - \sum_{\xi \in M'(x)} B(x, \xi)\tilde{y}(\xi) + \tilde{F}(x), \quad x \in \omega_h,$$

$$\tilde{y}(x) = \tilde{\mu}(x), \quad x \in \gamma_h.$$

В соответствии с [6], разностная схема (1), (2) называется монотонной, если из условий

$$\begin{aligned} \tilde{F}(x) - F(x) \geq 0, \quad \tilde{\mu}(x) - \mu(x) \geq 0, \\ (\tilde{F}(x) - F(x) \leq 0, \quad \tilde{\mu}(x) - \mu(x) \leq 0) \end{aligned} \tag{6}$$

следует выполнение неравенств

$$\tilde{y}(x) - y(x) \geq 0, \quad (\tilde{y}(x) - y(x) \leq 0). \quad (7)$$

Точная разностная схема. При аппроксимации нелинейного члена в уравнении Фишера будем ориентироваться на точную разностную схему [7]

$$\frac{y^{n+1} - y^n}{\tau} = \left[\frac{1}{y^{n+1} - y^n} \int_{y^n}^{y^{n+1}} \frac{dy}{f(y)} \right]^{-1}, \quad y^0 = u_0,$$

$$y^n = y(t_n), \quad t_n \in \bar{\omega}_\tau, \quad \bar{\omega}_\tau = \{t_n = n\tau, \quad n = 0, 1, \dots\},$$

аппроксимирующую задачу Коши для обыкновенного дифференциального уравнения

$$\frac{du}{dt} = f(u), \quad u = u(t), \quad u(0) = u_0.$$

С л е д с т в и е. Для квадратичной нелинейности $f(u) = u^2$ точная разностная схема имеет безытерационный вид

$$\frac{y^{n+1} - y^n}{\tau} = y^n y^{n+1}, \quad y^0 = u_0. \quad (8)$$

Разностная схема для уравнения Фишера. Это уравнение также известно как уравнение Колмогорова–Петрова–Пискунова [1]. Оно названо в честь статистика и биолога Рональда Фишера, предложившего его в 1937 г. для описания процессов популяционной динамики [2]. Поставим для этого уравнения начальную задачу с краевыми условиями Дирихле:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \lambda u(1 - u), \quad \lambda = \text{const} > 0, \quad (9)$$

$$u(x, 0) = u_0(x), \quad u(0, t) = \mu_1(t), \quad u(l, t) = \mu_2(t). \quad (10)$$

В [3] изучаются вопросы существования неотрицательных и устойчивых решений. В частности, доказывается, что если входные данные неотрицательны

$$u(x, 0) = u_0(x), \quad u(0, t) = \mu_1(t), \quad u(l, t) = \mu_2(t), \quad (11)$$

$$\bar{Q}_T = \{(x, t) : 0 \leq x \leq l, \quad t \geq 0\},$$

то и для точного решения имеет место аналогичная двусторонняя оценка

$$0 \leq u(x, t) \leq 1, \quad (x, t) \in \bar{Q}_T. \quad (12)$$

На равномерной пространственно-временной сетке с постоянными шагами h, τ по пространству и времени соответственно [8]:

$$\bar{\omega} = \bar{\omega}_h \times \bar{\omega}_\tau, \quad \bar{\omega}_h = \omega_h \cup \{x_0 = 0, \quad x_N = l\}, \quad \omega_h = \{x_i = ih, \quad i = \overline{1, N-1}, \quad hN = l\},$$

$$\bar{\omega}_\tau = \{t_n = n\tau, \quad n = 0, 1, \dots\} = \omega_\tau \cup \{t_0 = 0\},$$

дифференциальную задачу (9), (10) аппроксимируем неявной разностной схемой с учетом (8)

$$y_t = \hat{y}_{\bar{x}x} + \lambda y(1 - \hat{y}), \quad (13)$$

$$y(x, 0) = u_0(x), \quad x \in \omega_h, \quad \hat{y}_0 = \hat{\mu}_1, \quad \hat{y}_N = \hat{\mu}_2. \quad (14)$$

В работе используются стандартные обозначения теории разностных схем [4, с. 260]:

$$v = v_i^n = v(x_i, t_n), \quad \hat{v} = v_i^{n+1}, \quad v_t = (\hat{v} - v) / \tau, \quad v_{\bar{x}x} = (v_{i+1}^n - 2v_i^n + v_{i-1}^n) / h^2.$$

А п р и о р н а я о ц е н к а. Запишем схему (13), (14) в каноническом виде (1), (2)

$$\begin{aligned} C_i^n y_i^{n+1} &= Ay_{i-1}^{n+1} + By_{i+1}^{n+1} + F_i^n, \\ y_0^{n+1} &= \mu_1^{n+1}, \quad y_N^{n+1} = \mu_2^{n+1}, \end{aligned}$$

в котором

$$\begin{aligned} A = B = \gamma, \quad \gamma &= \tau / h^2, \quad C_i^n = 1 + 2\gamma + \lambda\tau y_i^n, \\ F_i^n &= (1 + \lambda\tau)y_i^n, \quad D_i^n = 1 + \lambda\tau y_i^n. \end{aligned}$$

Относительно входных данных предполагаем выполненными условия (11). Докажем, что и для решения разностной схемы (13), (14) при всех $(x, t) \in \bar{\omega}$ выполнен разностный аналог дифференциального свойства решения непрерывной задачи (12). Следуя методу математической индукции предположим, что

$$0 \leq y_i^n \leq 1 \text{ для всех } i = 0, 1, \dots, N. \tag{15}$$

При таком предположении выполнены все условия леммы и на основании неравенства (5) находим оценку

$$m_1^n \leq y_i^{n+1} \leq m_2^n, \quad i = 0, 1, \dots, N,$$

где

$$\begin{aligned} m_1^n &= \min \left\{ \min \{ \mu_1^{n+1}, \mu_2^{n+1} \}, \min_{x \in \omega_h} \frac{(1 + \lambda\tau)y_i^n}{1 + \lambda\tau y_i^n} \right\} \geq 0, \\ m_2^n &= \max \left\{ \max \{ \mu_1^{n+1}, \mu_2^{n+1} \}, \max_{x \in \omega_h} \frac{(1 + \lambda\tau)y_i^n}{1 + \lambda\tau y_i^n} \right\} \leq \max \left\{ 1, \frac{1 + \lambda\tau y_i^n}{1 + \lambda\tau y_i^n} \right\} \leq 1. \end{aligned}$$

Следовательно, оценка (15) выполнена для произвольного $n = 0, 1, \dots$. На основании данного неравенства заключаем, что

$$\max_{t \in \bar{\omega}_\tau} \|y(t)\|_{\bar{C}} \leq 1,$$

где норма $\|\cdot\|_{\bar{C}}$ определяется как обычно

$$\|y(t)\|_{\bar{C}} = \max_{x \in \bar{\omega}_h} |y(x, t)|.$$

Б е з у с л о в н а я м о н о т о н н о с т ь. Разностную схему (13), (14) будем называть безусловно монотонной, если она монотонна при произвольных значениях сеточных шагов. Рассмотрим разностную задачу с возмущенными входными данными

$$\tilde{y}_t = \hat{y}_{\bar{x}\bar{x}} + \lambda\tilde{y}(1 - \hat{y}), \tag{16}$$

$$\tilde{y}(x, 0) = \tilde{u}_0(x), \quad x \in \bar{\omega}_h, \quad \hat{y}_0 = \hat{\mu}_1, \quad \hat{y}_N = \hat{\mu}_2. \tag{17}$$

Относительно возмущенных входных данных предполагаем выполненными условия (11) и (6)

$$\tilde{u}_0(x) - u_0(x) \geq 0, \quad x \in \bar{\omega}_h, \quad \tilde{\mu}_k(t_{n+1}) - \mu_k(t_{n+1}) \geq 0, \quad k = 1, 2, \quad t_{n+1} \in \omega_\tau.$$

Вычитая из уравнений (16), (17) соответствующие уравнения (13), (14), получим задачу для возмущения $\bar{y} = \tilde{y} - y$:

$$\bar{y}_t = \hat{y}_{\bar{x}\bar{x}} + \lambda\bar{y} - \lambda\hat{y}\bar{y} + \lambda\hat{y}\bar{y}, \quad \hat{y}_0 = \hat{\mu}_1, \quad \hat{y}_N = \hat{\mu}_2.$$

Определим сеточные функции

$$F = (1 + \lambda\tau)\bar{y} - \lambda\tau\hat{y}\bar{y}, \quad D = 1 + \lambda\tau\bar{y} \geq 0.$$

Пусть на n -м временном слое разностное решение является монотонным в смысле (7). Докажем, что оно является монотонным и на $(n + 1)$ -м временном слое. Так как сеточная функция \hat{y} удовлетворяет неравенству $y^{n+1} \leq 1$, то функция

$$F = (1 + \lambda\tau - \lambda\tau\hat{y})\bar{y} \geq \bar{y} \geq 0$$

является неотрицательной. На основании леммы для \bar{y}^{n+1} получаем неравенство

$$\bar{y}^{n+1} \geq \min \left\{ \min \{ \bar{\mu}_1^{n+1}, \bar{\mu}_2^{n+1} \}, \min_{x \in \omega_h} \frac{F}{D} \right\} \geq 0.$$

Итак, мы доказали монотонность разностной схемы при произвольных соотношениях на сеточные шаги τ и h .

Г л о б а л ь н а я у с т о й ч и в о с т ь. Разностную схему (13), (14) назовем глобально устойчивой в равномерной норме, если для любого $0 < t \in \bar{\omega}_\tau$ выполнено неравенство

$$\|\tilde{y}(t) - y(t)\|_{\bar{C}} \leq \max \left\{ \max_{k=1,2} \{ \tilde{\mu}_k(t) - \mu_k(t) \}, \|\tilde{u}_0 - u_0\|_{\bar{C}} \right\}. \quad (18)$$

Для доказательства данного утверждения нужно наложить более жесткие условия на входные данные

$$0,5 \leq u_0(x), \quad \mu_k(t) \leq 1, \quad k = 1, 2, \quad (x, t) \in \bar{Q}_T. \quad (19)$$

Имеет место следующее утверждение.

Т е о р е м а. Пусть выполнены условия (19). Тогда разностная схема (13), (14) глобально устойчива в равномерной норме и имеет место оценка (18).

З а м е ч а н и е 1. Полученные выше результаты обобщаются на многомерные квазилинейные уравнения с конвективными слагаемыми

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \sum_{\alpha=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(k_\alpha(x, t, u) \frac{\partial u}{\partial x_\alpha} \right) + \sum_{\alpha=1}^2 r_\alpha(x) \frac{\partial u}{\partial x_\alpha} - q(x)u(x) + \lambda(1-u)u, \quad x = (x_1, x_2).$$

Вывод основывается на том, что минимальное и максимальное значения решения не зависят как от конвективных коэффициентов $r_\alpha(x_1, x_2)$, так и диффузионных $k_\alpha(x_1, x_2, t, u)$ [5]. Подробному исследованию данного вопроса будет посвящена отдельная работа.

З а м е ч а н и е 2. Среди экономичных разностных схем, которые наследуют асимптотическое свойство устойчивости дифференциального решения, отметим локально-одномерные схемы, предложенные А. А. Самарским [4].

Список использованных источников

1. Колмогоров, А. Н. Исследование уравнения диффузии, соединенной с возрастанием количества вещества, и его применение к одной биологической проблеме / А. Н. Колмогоров, И. Г. Петровский, Н. С. Пискунов // Бюллетень МГУ. Секция А. – 1937. – Т. 1, № 6. – С. 1–25.
2. Fisher, R. A. The Wave of Advance of Advantageous Genes / R. A. Fisher // Annals of Eugenics. – 1937. – N 7. – P. 355–369. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1937.tb02153.x>
3. Murray, J. D. Mathematical Biology: I. An Introduction, Third Edition / J. D. Murray. – Berlin, 2001. – 551 p.
4. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М., 1983. – 616 с.
5. Matus, P. Analysis of second order difference schemes on non-uniform grids for quasilinear parabolic equations / Piotr Matus, Le Minh Hieu, Lubin G. Vulkov // J. Comput. Appl. Math. – 2017. – Vol. 310. – P. 186–199. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2016.04.006>
6. Matus, P. Stability and monotonicity of difference schemes for nonlinear scalar conservation laws and multidimensional quasi-linear parabolic equations / P. Matus, S. Lemeshevsky // Comp. Method Appl. Math. – 2009. – Vol. 9, N 3. – P. 253–280. <https://doi.org/10.2478/cmam-2009-0016>

7. Lemeshevsky, S. Exact finite-difference schemes / S. Lemeshevsky, P. Matus, D. Poliakov. – De Gruyter, 2016. – 233 p. <https://doi.org/10.1515/9783110491326>

8. Samarskii, A. A. Difference schemes with operator factors / A. A. Samarskii, P. P. Matus, P. N. Vabishchevich. – Dordrecht, 2002. – 384 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9874-3>

References

1. Kolmogorov A. N., Petrovsky I. G., Piskunov N. S. Study of the diffusion equation with increase in the amount of substance, and its application to a biological problem. *Byulleten' Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Sektsiya A* [Bulletin of the Moscow State University, Section A], 1937, vol. 1, no. 6, pp. 1–25 (in Russian).

2. Fisher R. A. The wave of advance of advantageous genes. *Annals of Eugenics*, 1937, no. 7, pp. 355–369. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1937.tb02153.x>

3. Murray J. D. *Mathematical Biology: I. An Introduction, Third Edition*. Berlin, 2001. 551 p.

4. Samarskii A. A. *Theory of difference schemes*. Moscow, 1983. 616 p. (in Russian).

5. Matus P., Le Minh Hieu, Vulkov L. G. Analysis of second order difference schemes on non-uniform grids for quasi-linear parabolic equations. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2017, vol. 310, pp. 186–199. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2016.04.006>

6. Matus P., Lemeshevsky S. Stability and monotonicity of difference schemes for nonlinear scalar conservation laws and multidimensional quasi-linear parabolic equations. *Computational Methods in Applied Mathematics*, 2009, vol. 9, no. 3, pp. 253–280. <https://doi.org/10.2478/cmam-2009-0016>

7. Lemeshevsky S., Matus P., Poliakov D. *Exact finite-difference schemes*. De Gruyter, 2016. 233 p. <https://doi.org/10.1515/9783110491326>

8. Samarskii A. A., Matus P. P., Vabishchevich P. N. *Difference schemes with operator factors*. Dordrecht, 2002. 384 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9874-3>

Информация об авторах

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

Пылак Дорота – адъюнкт. Католический университет им. Иоанна Павла II г. Люблина (Ал. Raclawickie, 14, 20-950, Люблин, Польша). E-mail: dorotab@kul.pl.

Information about the authors

Matus Piotr P. – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher. Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus (11, Sorganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: piotr.p.matus@gmail.com.

Pylak Dorota – Assistant Professor. The John Paul II Catholic University of Lublin (8, Al. Raclawickie, 20-950, Lublin, Poland). E-mail: dorotab@kul.pl.

Inna N. Safonova¹, Alexander N. Skiba²

¹Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

²Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus

ON SOME CLASSES OF FINITE σ -SOLUBLE $P\sigma T$ -GROUPS

(Communicated by Academician Vyacheslav I. Yanchevsky)

Abstract. Let \mathfrak{X} be a class of groups. Suppose that with each group $G \in \mathfrak{X}$ we associate some system of its subgroups $\tau(G)$. Then τ is said to be a *subgroup functor* on \mathfrak{X} if the following conditions are hold: (1) $G \in \tau(G)$ for each group $G \in \mathfrak{X}$; (2) for any epimorphism $\varphi: A \rightarrow B$, where $A, B \in \mathfrak{X}$, and for any groups $H \in \tau(A)$ and $T \in \tau(B)$ we have $H^\varphi \in \tau(B)$ and $T^{\varphi^{-1}} \in \tau(A)$. In this paper, were considered some applications of such subgroup functors in the theory of finite groups in which generalized normality for subgroups is transitive.

Keywords: finite group, modular subgroup, σ -subnormal subgroup, σ -soluble group, subgroup functor

For citation. Safonova I. N., Skiba A. N. On some classes of finite σ -soluble $P\sigma T$ -groups. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 6, pp. 460–464. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-460-464>

И. Н. Сафонова¹, А. Н. Скиба²

¹Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

²Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, Гомель, Республика Беларусь

О НЕКОТОРЫХ КЛАССАХ КОНЕЧНЫХ σ -РАЗРЕШИМЫХ $P\sigma T$ -ГРУПП

(Представлено академиком В. И. Янчевским)

Аннотация. Пусть \mathfrak{X} – класс групп. Предположим, что каждой группе $G \in \mathfrak{X}$ сопоставлена некоторая система ее подгрупп $\tau(G)$. Тогда говорят, что τ – подгрупповой функтор на \mathfrak{X} , если выполняются следующие условия: (1) $G \in \tau(G)$ для каждой группы $G \in \mathfrak{X}$; (2) для любого эпиморфизма $\varphi: A \rightarrow B$, где $A, B \in \mathfrak{X}$, и для любых групп $H \in \tau(A)$ и $T \in \tau(B)$ имеем $H^\varphi \in \tau(B)$ и $T^{\varphi^{-1}} \in \tau(A)$. Рассмотрены некоторые приложения таких подгрупповых функторов в теории конечных групп, у которых транзитивна обобщенная нормальность для подгрупп.

Ключевые слова: конечная группа, модулярная подгруппа, σ -субнормальная подгруппа, σ -разрешимая группа, подгрупповой функтор

Для цитирования. Сафонова, И. Н. О некоторых классах конечных σ -разрешимых $P\sigma T$ -групп / И. Н. Сафонова, А. Н. Скиба // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 6. – С. 460–464. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-460-464>

Introduction. Throughout this paper, all groups are finite and G always denotes a finite group; $\mathcal{L}(G)$ is the lattice of all subgroups of G . Moreover, $\sigma = \{\sigma_i \mid i \in I\}$ is some partition of the set of all primes \mathbb{P} and if G is a σ_i -group for some i , then G is called σ -primary [1]; G is said to be [2]: σ -soluble if every chief factor of G is σ -primary; σ -nilpotent if G is the direct product of σ -primary groups.

If n is an integer, the symbol $\pi(n)$ denotes the set of all primes dividing n ; as usual, $\pi(G) = \pi(|G|)$, the set of all primes dividing the order of G ; $\sigma(n) = \{\sigma_i \mid \sigma_i \cap \pi(n) \neq \emptyset\}$ and $\sigma(G) = \sigma(|G|)$ [2].

Let \mathfrak{X} be a class of groups. Suppose that with each group $G \in \mathfrak{X}$ we associate some system of its subgroups $\tau(G)$. Then we say that τ is a *subgroup functor* (in the sense of Skiba [3]) on \mathfrak{X} if the following conditions hold: (1) $G \in \tau(G)$ for each group $G \in \mathfrak{X}$; (2) for any epimorphism $\varphi: A \rightarrow B$, where $A, B \in \mathfrak{X}$, and for any groups $H \in \tau(A)$ and $T \in \tau(B)$ we have $H^\varphi \in \tau(B)$ and $T^{\varphi^{-1}} \in \tau(A)$.

The subgroup functors of this kind have found numerous applications in the formation theory and in the Schunk classes theory (see, for example, the books [3–6]).

In this paper, we discuss some applications of the subgroup functors of this kind in the theory of generalized T -groups.

A subgroup A of G is said to be: *quasinormal* or *permutable* in G if A permutes with every subgroup H of G , that is, $AH = HA$; *Sylow permutable* or *S-permutable* if A permutes with all Sylow subgroups of G .

A group G is said to be a T -group if normality is a transitive relation on G , that is, if H is a normal subgroup of K and K is a normal subgroup of G , then H is a normal subgroup of G . In other words, the group G is a T -group if and only if every subnormal subgroup of G is normal. The description of T -groups was first obtained by Gaschütz [7] for the soluble case, and by Robinson in [8], for the general case. The works [7; 8] aroused great interest in the further study of T -groups and generalized T -groups (PT -groups, i. e. groups in which quasinormality is transitive; PST -groups, i. e. groups, in which Sylow permutability is transitive, MT -groups, i. e. groups, in which modularity is transitive and etc.).

In the last 10 years, considerable attention has been paid to the study of generalized T -groups in the theory of σ -properties of a group. Recall that a σ -property of a group is understood to be any of its properties that depends on σ and which does not imply any restrictions on σ .

A subgroup A of G is said to be: (i) σ -subnormal in G if there is a subgroup chain $A = A_0 \leq A_1 \leq \dots \leq A_n = G$ such that either $A_{i-1} \trianglelefteq A_i$ or $A_i / (A_{i-1})_{A_i}$ is σ -primary for all $i = 1, \dots, n$; (ii) σ -semipermutable in G (J. C. Beidleman) if $x \in N_G(A)$ for all $x \in G$ such that $\sigma(|x|) \cap \sigma(A) = \emptyset$; (iii) σ -permutable in G if G is σ -full, that is, G has a Hall σ_i -subgroup for every $\sigma_i \in \sigma(G)$ and A permutes with all such Hall subgroups of G .

In fact, the appearance of the theory of σ -properties of a group was mainly connected with attempts to solve the following difficult problem.

Q u e s t i o n (See [1]). *What is the structure of a $P\sigma T$ -group, that is, a σ -full group G in which σ -permutability is transitive on G , that is, if H is a σ -permutable subgroup of K and K is a σ -permutable subgroup of G , then H is a σ -permutable subgroup of G ?*

This problem turned out to be difficult even in the σ -soluble case: its solution in this case required the development of many aspects of the theory of σ -properties of a group. The theory of σ -soluble $P\sigma T$ -groups was mainly developed in the papers of J. Beidleman, A. Ballester-Bolinches, I. N. Safonova, A. N. Skiba, M. K. Pedraza-Aguilera, W. Pérez-Calabuig, Ch. Zhang, W. Guo, A-Ming Liu, and a number of other authors, and the following theorem (which, in fact, is the main result of papers [1; 9]) is the key result in this direction.

T h e o r e m 1 [9]. *If G is a σ -soluble $P\sigma T$ -group and $D = G^{\mathfrak{N}\sigma}$, then the following conditions hold: (i) $G = D \rtimes M$, where D is an abelian Hall subgroup of G of odd order, M is σ -nilpotent and every element of G induces a power automorphism in D ; (ii) $O_{\sigma_i}(D)$ has a normal complement in a Hall σ_i -subgroup of G for all i . Conversely, if Conditions (i) and (ii) hold for some subgroups D and M of G , then G is a σ -soluble $P\sigma T$ -group.*

In this theorem, $G^{\mathfrak{N}\sigma}$ is the σ -nilpotent residual of G , that is, the intersection of all normal subgroups N of G with σ -nilpotent quotient G/N .

In this paper, we show that Theorem 1 can be substantially strengthened on the basis of the theory of subgroup functors. First of all, we say that a group $G \in \mathfrak{X}$ is τ -saturated if for every its subgroup A we have $A \in \tau(G)$; if $A \in \tau(G)$, then we say that A is a τ -subgroup of G . In the case when \mathfrak{X} is the class of all groups, we will simply say “subgroup functor” instead of “subgroup functor on \mathfrak{X} ”.

D e f i n i t i o n 1. Let \mathfrak{X} be the class of all σ -soluble groups. Then we say that a subgroup functor τ on \mathfrak{X} is σ -special if for every group $G \in \mathfrak{X}$ the following three conditions hold:

- (*) each of the σ -subnormal τ -subgroups of G is σ -permutable in G ;
- (**) $\langle A, B \rangle \in \tau(G)$ for any two σ -subnormal τ -subgroups A, B of G ;
- (***) if $G = D \rtimes M$ is a $P\sigma T$ -group, where $D = G^{\mathfrak{N}\sigma}$, and A is a σ -primary σ -subnormal subgroup of G such that $A \in \tau(M)$, then $A \in \tau(G)$.

D e f i n i t i o n 2. Let \mathfrak{X} be the class of all σ -soluble groups. Then we say that a subgroup functor τ on \mathfrak{X} is closed if for every group $G \in \mathfrak{X}$ the following three conditions hold:

- (I) if $A \leq E \leq G$ and $A \in \tau(G)$, then $A \in \tau(E)$;
- (II) if $G = D \rtimes L$, where D is a Hall subgroup of G and $A \in \tau(D)$, then $A \in \tau(G)$;
- (III) $A \in \tau(G)$ for every normal subgroup A of G .

The meaning of the concepts introduced above is connected, first of all, with the following two theorems.

Theorem 2 [10]. *Suppose that G is a σ -soluble group with $D = G^{\mathfrak{N}\sigma}$, and let τ be a σ -special subgroup functor on the class of all σ -soluble groups \mathfrak{X} . If every σ -subnormal subgroup of G is a τ -subgroup of G , then G is a $P\sigma T$ -group and the following conditions hold: (i) $G = D \rtimes M$, where D is an abelian Hall subgroup of G of odd order, M is a σ -nilpotent τ -saturated group and every element of G induces a power automorphism in D ; (ii) $O_{\sigma_i}(D)$ has a normal complement in a Hall σ_i -subgroup of G for all i . Conversely, if Conditions (i) and (ii) hold for some subgroups D and M of G , then every σ -subnormal subgroup of G belongs to $\tau(G)$.*

Theorem 3 [10]. *Let G be a σ -soluble group and let τ be a σ -special closed subgroup functor on the class of all σ -soluble groups \mathfrak{X} . Then every σ -subnormal subgroup of G is a τ -subgroup of G if and only if G is a $P\sigma T$ -group and every Hall σ_i -subgroup of G is τ -saturated for all $i \in I$.*

Applications of Theorems 2 and 3 are based on the following our results.

Theorem 4. *Let \mathfrak{X} be the class of all σ -soluble groups and $\tau(X)$ be the set of all σ -permutable subgroups of X for each group $X \in \mathfrak{X}$. Then τ is a subgroup functor on \mathfrak{X} and such a functor τ is both σ -special and closed.*

Theorem 5. *Let \mathfrak{X} be the class of all σ -soluble groups and $\tau(X)$ be the set of all modular (respectively, normal) subgroups of X for each group $X \in \mathfrak{X}$. Then τ is a subgroup functor on \mathfrak{X} and such a functor τ is both σ -special and closed.*

Theorem 6. *Let \mathfrak{X} be the class of all σ -soluble groups and $\tau(X)$ be the set of all σ -hypercentrally embedded subgroups of X for each group $X \in \mathfrak{X}$. Then τ is a subgroup functor on \mathfrak{X} and such a functor τ is both σ -special and closed.*

Proofs of Theorems 4, 5 and 6. Using simple inductive reasoning, we can prove the following lemmas.

Lemma 1. *Let $N \leq A, B$ be subgroups of a σ -soluble group G , where N is normal in G . Suppose that $\{\sigma_1, \dots, \sigma_t\} = \sigma(G)$ and H_i is a Hall σ_i -subgroup of G for all $i = 1, \dots, t$.*

(1) *If $AH_i^x = H_i^x A$ for all $i = 1, \dots, t$ and all $x \in G$, then A is σ -permutable in G .*

(2) *A/N is σ -permutable in G/N if and only if A is σ -permutable in G .*

(3) *If A is σ -permutable in G and $A \leq B$, then A is σ -permutable in B .*

Lemma 2. *Suppose that $G = D \rtimes M$ is a σ -soluble $P\sigma T$ -group, where $D = G^{\mathfrak{N}\sigma}$, is a Hall abelian subgroup of G . If A is a σ -primary σ -subnormal subgroup of G and $A \leq M$, then $D \leq C_G(A)$.*

Lemma 3. *Let A be a σ -hypercentrally embedded subgroup of G . If G has a Hall σ_i -subgroup H for some i , then $AH = HA$.*

Lemma 4. *The set of all σ -hypercentrally embedded subgroups of G forms a sublattice of the lattice $\mathcal{L}(G)$.*

Lemma 5. *Let A, B and H be subgroups of G . If $AH = HA$ and $BH = HB$, then $\langle A, B \rangle H = H \langle A, B \rangle$.*

Proof of Theorem 4. In view of Lemma 1 (2), τ is a subgroup functor (in the above sense) on \mathfrak{X} . Let $G \in \mathfrak{X}$. Clearly, Conditions (*) and (***) hold for G . Moreover, in view of Lemma 5, Condition (**) also holds for G . Hence the functor τ is σ -special.

Now we show that the functor τ is closed. Condition (I) holds for G by Lemma 1 (3). Condition (III) also holds for G since every σ -soluble group is σ -full by [2, Theorem B].

Now let $G = D \rtimes M$, where D is a Hall subgroup of G , and let L be a σ -permutable subgroup of D . Let H be a Hall σ_i -subgroup of G for some $i \in I$. Then $H = (H \cap D) \times (H \cap M)$, where $H \cap D$ is a Hall σ_i -subgroup of D . Therefore $L(H \cap D) = (H \cap D)L$ and also we have $[L, M] = 1$. Hence $LH = L(H \cap D)(H \cap M) = (H \cap D)(H \cap M)L$. Therefore L is σ -permutable in G , so Condition (II) holds for G . Hence the functor τ is closed. The theorem is proved.

Recall that a subgroup M of G is said to be *modular* in G if M is a modular element (in the sense of Kurosh [11, p. 43]) of the lattice $\mathcal{L}(G)$, that is, (i) $\langle X, M \cap Z \rangle = \langle X, M \rangle \cap Z$ for all $X \leq G, Z \leq G$ such that $X \leq Z$, and (ii) $\langle M, Y \cap Z \rangle = \langle M, Y \rangle \cap Z$ for all $Y \leq G, Z \leq G$ such that $M \leq Z$.

Proof of Theorem 5. In view of [11, p. 201, Properties (3), (4)], τ is a subgroup functor (in the above sense) on \mathfrak{X} .

We show that the functor τ is σ -special. Let $G \in \mathfrak{X}$. If A is a σ -subnormal modular subgroup of G , then A is σ -permutable in G by [12, Theorem C], so Condition (*) holds for G . Condition (**) holds for G by [11, p. 201, Property (5)]. Finally, suppose that $G = D \rtimes M$ is a $P\sigma T$ -group, where $D = G^{\sigma\tau}$, and let A be a σ -primary σ -subnormal subgroup of G such that A is a modular subgroup of M . We show that in this case A is a modular subgroup of G . In view of [11, Lemma 5.1.13], it is enough to show that A is modular in $\langle x, A \rangle$ for any element x of G of prime power order p^n .

If $x \in D$, it is true by Lemma 2. Now assume that $x \notin D$ and so $x \in M^d$ for some $d \in D$ since M is a Hall subgroup of G . But A is modular in M and so A is modular in M^d since $A^d = A$ by Lemma 2. Therefore A is modular in $\langle x, A \rangle$. Hence Condition (***) holds for G , so τ is a σ -special subgroup functor on \mathfrak{X} .

Now we show that the functor τ is closed. Indeed, Conditions (I) and (III), clearly, hold for G , and if $G = D \times M$, where D is a Hall subgroup of G and $L \in \tau(D)$, then, arguing as above, we can show that L is a modular subgroup of G and hence Condition (II) also holds for G .

Finally, if $\tau(X)$ is the set of all normal subgroups of X for each group $X \in \mathfrak{X}$, then, arguin as above, we can show that τ is a subgroup functor on \mathfrak{X} and such a functor τ is both σ -special and closed. The theorem is proved.

We say, following [9], that a subgroup A of G is σ -hypercentrally embedded in G if either $A \trianglelefteq G$ or every chief factor H/K of G between A_G and A^G is σ -central in G [1], that is, $(H/K) \rtimes (G/C_G(H/K))$ is σ -primary.

P r o o f of Theorem 6. It is not difficult to show that τ is a subgroup functor (in the above sence) on \mathfrak{X} .

Now we show that τ is a σ -special subgroup functor on \mathfrak{X} . Let $G \in \mathfrak{X}$. In view of Lemma 3, Condition (*) holds for G . On the other hand, since the set of all σ -hypercentrally embedded subgroups of G forms a sublattice of the lattice $\mathcal{L}(G)$ by Lemma 4, Condition (**) also holds for G .

Finally, let $G = D \rtimes M$ be a $P\sigma T$ -group, where $D = G^{\sigma\tau}$, and A is a σ -subnormal σ_i -subgroup of G , $i \in I$, such that A is a σ -hypercentrally embedded subgroup of M . Then $D \leq C_G(A)$ by Lemma 2, so $A_G = A_{DM} = A_M$ and $A^G = A^{DM} = A^M \leq O_{\sigma_i}(G) \cap M$. It follows that A is normal in G in the case when A is normal in M . Moreover, if H/K is a chief factor of G between $A_G = A_M$ and $A^G = A^M$, then H/K is a chief factor of M and $C_G(H/K) = DC_M(H/K)$ since $[D, A^G] = 1$ by Lemma 2, so

$$\begin{aligned} G/C_G(H/K) &= DM/DC_M(H/K) \simeq M/(M \cap DC_M(H/K)) = \\ &= M/C_M(H/K)(M \cap D) = M/C_M(H/K) \end{aligned}$$

is a σ_i -group. Hence H/K is σ -central in G , so A is σ -hypercentrally embedded in G . Therefore Condition (***) holds for G , so τ is a σ -special subgroup functor on \mathfrak{X} .

Similarly, it can be proved that τ is a closed subgroup functor on \mathfrak{X} . The theorem is proved.

Some applications. Theorems 4, 5 and 6 allow us to generalize many well-known results. In this section, we present some of these results. First of all note that from Theorems 2 and 4 we get in the case $\sigma = \{\{2\}, \{3\}, \{5\}, \dots\}$ the follwing classical result.

C o r o l l a r y 1 [7]. *A group G is a soluble T -group if and only if the following conditions are satisfied: (i) the nilpotent residual D of G is an abelian Hall subgroup of odd order; (ii) G acts by conjugation on D as a group power automorphisms; (iii) G/D is a Dedekind group.*

We say that G is a T_σ -group if every σ -subnormal subgroup of G is normal.

From Theorems 2 and 5 we get the follwing known results.

C o r o l l a r y 2 [13]. *A σ -soluble group G with $D = G^{\sigma\tau}$ is a T_σ -group if and only if the following conditions hold: (i) $G = D \rtimes M$, where D is an abelian Hall subgroup of G of odd order, and M is a Dedekind group; (ii) every element of G induces a power automorphism in D ; (iii) $O_{\sigma_i}(D)$ has a normal complement in a Hall σ_i -subgroup of G for all i .*

Recall that an *Iwasawa group* is a group in which every subgroup is quasinormal.

C o r o l l a r y 3 [14]. *A group G is a soluble PT -group if and only if the following conditions are satisfied: (i) the nilpotent residual D of G is an abelian Hall subgroup of odd order; (ii) G acts by conjugation on D as a group power automorphisms; (iii) G/D is an Iwasawa group.*

Corollary 4 [12]. Let $D = G^{\mathfrak{M}\sigma}$. Then G is a σ -soluble in which every σ -subnormal subgroup is modular if and only if the following conditions hold: (i) $G = D \rtimes M$, where D is an abelian Hall subgroup of G of odd order, L is σ -nilpotent and the lattice $\mathcal{L}(M)$ is modular; (ii) every element of G induces a power automorphism in D ; (iii) $O_{\sigma_i}(D)$ has a normal complement in a Hall σ_i -subgroup of G for all i .

Corollary 5 [9]. A group G is a σ -soluble $P\sigma T$ -group if and only if every σ -subnormal subgroup of G is σ -hypercentrally embedded in G .

From Theorems 3 and 5 we get the following known results.

Corollary 6 [15]. A σ -soluble group G is a T_σ -group if and only if G is a soluble T -group and the Hall σ_i -subgroups of G are Dedekind for all $i \in I$.

Acknowledgements. Research was supported by the Ministry of Education of the Republic of Belarus (No. 20211328, 20211778).

Благодарности. Исследования поддержаны Министерством образования Республики Беларусь (№ 20211328, 20211778).

References

1. Skiba A. N. On σ -subnormal and σ -permutable subgroups of finite groups. *Journal of Algebra*, 2015, vol. 436, no. 8, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jalgebra.2015.04.010>
2. Skiba A. N. A generalization of a Hall theorem. *Journal of Algebra and its Applications*, 2016, vol. 15, no. 5, pp. 21–36. <https://doi.org/10.1142/s0219498816500857>
3. Skiba A. N. *Algebra of formations*. Minsk, 1997. 240 p. (in Russian).
4. Kamornikov S. F., Selkin M. V. *Subgroup functors and classes of finite groups*. Minsk, 2003. 254 p. (in Russian).
5. Guo W. *Structure Theory for Canonical Classes of Finite Groups*. Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 2015. 359 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45747-4>
6. Vorob'ev N. N. *Algebra of Classes of Finite Groups*. Vitebsk, 2012. 322 p. (in Russian).
7. Gaschütz W. Gruppen, in denen das Normalteilersein transitiv ist. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 1957, vol. 198, pp. 87–92 (in German).
8. Robinson D. J. S. The structure of finite groups in which permutability is a transitive relation. *Journal of the Australian Mathematical Society*, 2001, vol. 70, no. 2, pp. 143–160. <https://doi.org/10.1017/s1446788700002573>
9. Skiba A. N. Some characterizations of finite σ -soluble $P\sigma T$ -groups. *Journal of Algebra*, 2018, vol. 495, no. 1, pp. 114–129. <https://doi.org/10.1016/j.jalgebra.2017.11.009>
10. Safonova I. N., Skiba A. N. Finite groups in which generalized normality is a transitive relation. *Cornell University Library, arXiv: 2302.13250v1 [math.GR]* 26 Feb. 2023. 47 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.13250>
11. Schmidt R. *Subgroup Lattices of Groups*. Berlin, 1994. <https://doi.org/10.1515/9783110868647>
12. Hu B., Huang J., Skiba A. N. A generalisation of finite PT -groups. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*, 2018, vol. 97, no. 3, pp. 396–405. <https://doi.org/10.1017/s0004972717001083>
13. Zhang C., Guo W., Liu A.-M. On a generalisation of finite T -groups. *Communications in Mathematics and Statistics*, 2022, vol. 10, pp. 153–162. <https://doi.org/10.1007/s40304-021-00240-z>
14. Zacher G. I gruppi risolubili finiti in cui i sottogruppi di composizione coincidono con i sottogruppi quasi-normali. *Atti della Accademia Nazionale dei Lincei, Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali*, 1964, vol. 37, no. 8, pp. 150–154.
15. Ballester-Bolinches A., Pedraza-Aguilera M. C., Pérez-Calabuig V. On two classes of generalised T -groups. *Revisita de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie A. Matemáticas*, 2023, vol. 117, art. 105. <https://doi.org/10.1007/s13398-023-01443-5>

Information about the authors

Safonova Inna N. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: in.safonova@mail.ru. ORCID: 0000-0001-6896-7208.

Skiba Alexander N. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor. Francisk Skorina Gomel State University (104, Sovetskaya Str., 246019, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: alexander.skiba49@gmail.com. ORCID: 0000-0002-6521-2712.

Информация об авторах

Сафонова Инна Николаевна – канд. физ.-мат. наук, доцент. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: in.safonova@mail.ru. ORCID: 0000-0001-6896-7208.

Скиба Александр Николаевич – д-р физ.-мат. наук, профессор. Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины (ул. Советская, 104, 246019, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: alexander.skiba49@gmail.com. ORCID: 0000-0002-6521-2712.

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

ХИМИЯ
CHEMISTRY

УДК 541.183.12
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-465-472>

Поступило в редакцию 21.02.2023
Received 21.02.2023

Академик В. С. Солдатов, Е. Г. Косандрович, Т. В. Безъязычная

*Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

**АНОМАЛЬНОЕ НАБУХАНИЕ В ВОДЕ КАРБОКСИЛЬНОГО ИОНИТА
В ФОРМАХ ИОНОВ АММОНИЯ И ТЕТРАЭТИЛАММОНИЯ**

Аннотация. Волокнистый карбоксильный ионит, полученный пост-радиационной прививкой полиакриловой кислоты к полипропиленовому волокну, в аммониевой форме обладает аномально низким набуханием, соответствующим 10 моль воды на эквивалент, а в форме иона тетраэтиламмония (NEt_4^+) – аномально высоким, равным 25 моль воды/экв. Учитывая, что NH_4^+ является гидрофильной частицей, а NEt_4^+ – гидрофобной, этот факт кажется парадоксальным. Делается попытка объяснить это явление с использованием молекулярного моделирования (*ab initio* расчеты структуры гидратных комплексов в приближении Хартри–Фока и молекулярной орбитали как линейной комбинации атомных орбиталей (МО ЛКАО) с базисным набором 6-31G) в сочетании с моделью Преобладающих гидратов, позволившей рассчитать теоретические изотермы сорбции воды ионитом из паровой фазы и сопоставить их с экспериментальными данными. Аномально низкое набухание ионита в NH_4^+ -форме вызвано образованием прочной связи карбоксилатного аниона с аммонием со значительной долей ковалентности за счет наложения кулоновского взаимодействия ионов и образования водородной связи между ними. Аномально высокое набухание NEt_4^+ -форм вызвано отсутствием сильного взаимодействия между катионами и карбоксилатными группами из-за невозможности их сближения по стерическим причинам. Высокое набухание ионита вызвано отсутствием блокировки гидрофильных карбоксилатных групп ионита водородными связями с катионом. Матрица ионита не содержит кросс-агента и не создает пространственного ограничения для высокого набухания ионита.

Ключевые слова: карбоксильные иониты, набухание, аммоний, тетраэтиламмония ионы, гидратация, молекулярное моделирование

Для цитирования. Солдатов, В. С. Аномальное набухание в воде карбоксильного ионита в формах ионов аммония и тетраэтиламмония / В. С. Солдатов, Е. Г. Косандрович, Т. В. Безъязычная // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 6. – С. 465–472. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-465-472>

Academician Vladimir S. Soldatov, Evgenii G. Kosandrovich, Tatiana V. Bezyazychnaya

*Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

**ABNORMAL SWELLING IN WATER OF CARBOXYLIC ION EXCHANGER IN THE FORMS
OF AMMONIUM AND TETRAETHYLAMMONIUM IONS**

Abstract. A fibrous carboxylic ion exchanger, obtained by post-radiation grafting of polyacrylic acid to polypropylene fiber, in the ammonium form has an abnormally low swelling in water, corresponding to 10 moles of water per equivalent, and in the form of tetraethylammonium ion (NEt_4^+) – abnormally high 25 moles of water/eq. Considering that NH_4^+ is a hydrophilic particle and NEt_4^+ is hydrophobic, this fact seems paradoxical. The article attempts to explain this phenomenon using molecular modeling (*ab initio* calculations of the structure of hydrate complexes in the HF MO LCAO approximation with the 6-31G basis set) in combination with the Predominant Hydrates Model, which made it possible to calculate the theoretical water sorption isotherms of the ion exchanger and compare them with experimental data. The abnormally low swelling of the ion exchanger in the NH_4^+ -form is caused by the formation of a strong bond between the carboxylate anion and ammonium with a significant degree of covalence due to the superposition of the Coulomb interaction of the ions and the formation

of a hydrogen bond between them. The abnormally high swelling of NEt_4^+ -forms is caused by the absence of a strong interaction between cations and carboxylate groups due to the impossibility of their convergence due to steric reasons. The high swelling of the ion exchanger is caused by the absence of blocking of the hydrophilic carboxylate groups of the ion exchanger by hydrogen bonds with the cation. The ion exchanger matrix does not contain a cross agent and does not create a spatial restriction for the high swelling of the ion exchanger.

Keywords: carboxylic ion exchangers, swelling, ammonium, tetraalkylammonium ions, hydration, molecular modeling

For citation. Soldatov V. S., Kosandrovich E. G., Bezyazychnaya T. V. Abnormal swelling in water of carboxylic ion exchanger in the forms of ammonium and tetraethylammonium ions. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 6, pp. 465–472 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-465-472>

Введение. Четвертичные аммониевые основания занимают особое место среди электролитов. Они сочетают свойства сильных неорганических щелочей и гидрофобных неполярных веществ. Подобно неорганическим электролитам они хорошо растворимы в воде [1], но, в отличие от них, этот процесс энергетически невыгоден и происходит с увеличением энтальпии благодаря возрастанию энтропии [2]. Это характерно для гидрофобных веществ и послужило одним из поводов для появления семантически противоречивого термина «гидрофобная гидратация» [3]. В настоящее время соединения этого класса нашли значительное практическое применение как лекарственные вещества, межфазные катализаторы, моющие средства, компоненты кремов и гигиенических средств, и в других областях практики. Исследуя свойства карбоксильного катионита с полиакрилатной матрицей в формах ионов аммония и всех этиламмониевых ионов, мы обнаружили, что он обладает аномально высоким набуханием в воде в форме иона тетраэтил-аммония (NEt_4^+) – самого гидрофобного из исследованных ионов, и самым низким набуханием в форме NH_4^+ – наиболее гидрофильного иона. С точки зрения традиционных представлений о взаимосвязи набухания ионитов и гидрофильности насыщающих их противоионов такой факт парадоксален. В настоящем сообщении приводится интерпретация этого явления на основе информации, полученной при совместном применении квантово-химического расчета структуры молекулярной модели этого ионита и термодинамического исследования изотермы сорбции воды с помощью модели Преобладающих гидратов (МППГ) [4]. Параллельно с NEt_4^+ приводятся аналогичные данные для NH_4^+ формы это же ионита. Последний взят как гидрофильный антипод иона NEt_4^+ .

Свойства ионита. Ионит, свойства которого сопоставляются с результатами проведенных расчетов, представлял собой полипропиленовое волокно с привитой на него полиакриловой кислотой. Способ его получения и свойства описаны в [5]. Методика изучения сорбции воды ионитом и полученные результаты представлены в [6]. Карбоксильные группы фиксированы на отрезках полиакрилатных цепей, привитых на основные полипропиленовые цепи, и равномерно распределены по объему волокна. Ионит не содержит кросс-агента. Его полная обменная емкость 4,2 м-экв/г Н-формы. Набухание в жидкой воде в NH_4^+ форме 12 моль воды/экв, в NEt_4^+ форме 35 моль воды/экв. Набухание в насыщенном водяном паре при 25 °С – 10 и 25 моль воды/экв соответственно. Различие в набухании из жидкости и пара называется парадоксом Шредера и не имеет однозначного объяснения [7]. При выполнении термодинамических расчетов использовалось набухание из пара, экстраполированное на 100 % относительную влажность.

Компьютерный эксперимент и термодинамические расчеты. В качестве молекулярной модели ионита выбран кластер, содержащий отрезок алифатической цепи с четырьмя карбоксилатными группами, заряды которых компенсированы ионами NEt_4^+ или NH_4^+ . Концы полимерной цепи замкнуты метильными группами. Кластеры содержали 56 молекул воды, что приблизительно соответствует реальному набуханию ионитов этого типа. Исследованные кластеры далее обозначены как $(\text{R-Et}_4^+)_4 \cdot 56\text{H}_2\text{O}$ и $(\text{R-NH}_4^+)_4 \cdot 56\text{H}_2\text{O}$.

Расчет структуры кластера проводился в приближении Хартри–Фока и МО ЛКАО с базисным набором 6-31G. По данным расчета расстояний от центра катионов до атомов кислорода молекул воды и карбоксилатных групп построены диаграммы их ранговых распределений « $L_{\text{O}}-N_L$ », которые были использованы при расчете состава эффективных гидратов в кластерах с использованием процедуры, описанной в [5].

Расчет теоретических изотерм сорбции воды ионитом из газовой фазы $W = f(P / P_0)$ проводился с помощью модели «Преобладающих гидратов», основные уравнения которой в адаптированной для данного случая форме, представлены ниже.



$$K_{Hi} = \frac{[RI \cdot q_i H_2O]}{[RI][H_2O]^{q_i}} = \frac{X_{Hi}}{X_R \alpha^{q_i}} = \exp\left(-\frac{\Delta G_{Wi}^0 q_i}{RT}\right), \quad (2)$$

$$n_{Hi} = K_{Hi} \left(1 - \sum_i n_{Hi}\right) \alpha^{q_i}, \quad (3)$$

$$n_{WF} = \frac{\alpha \left(W_0 - \sum_i q_i n_{Hi}\right)}{1 + W_0 - \sum_i q_i n_{Hi} - \alpha \left(W_0 - \sum_i q_i n_{Hi}\right)}, \quad (4)$$

$$W = \sum_i q_i n_{Hi} + n_{WF}, \quad (5)$$

$$p_{w1} = n_{w1} / (n_{w1} + n_{c1}), \quad (6)$$

где $\alpha = P / P_0$ – активность воды, равная относительной влажности газовой фазы; W – сорбция воды ионитом, $W_0 = W$ при $P = P_0$; K_{Hi} – константа образования i -гидрата; ΔG_{Wi}^0 – свободная энергия образования i -гидрата (ΔG_{Hi}^0), отнесенная к одной молекуле воды; q_i – число молекул воды в гидрате i ; n_{Hi} , n_{WF} – числа молей гидратов и свободной воды; n_{wi} и n_{ci} – числа атомов кислорода молекул воды и карбоксилатной группы в i -м координационном слое катиона; $p_{w1} = n_{w1} / (n_{w1} + n_{c1})$ – частота нахождения молекулы воды в первом координационном слое катиона.

Процедура расчета детально описана в [5] и будет кратко объяснена в соответствующем месте в тексте.

Система уравнений (1)–(6) позволяет рассчитать теоретическую изотерму сорбции воды $W = f(P / P_0)$, если известны следующие параметры: ΔG_{Wi}^0 , i , q_i , p_{w1} и W_0 .

Параметры i , q_i , p_{w1} находятся из анализа диаграмм рангового распределения по расстояниям атомов кислорода от азота L_O-N_L , которые были определены прямым измерением на трехмерных изображениях структур, используя стандартные возможности программы HyperChem. Расстоя-

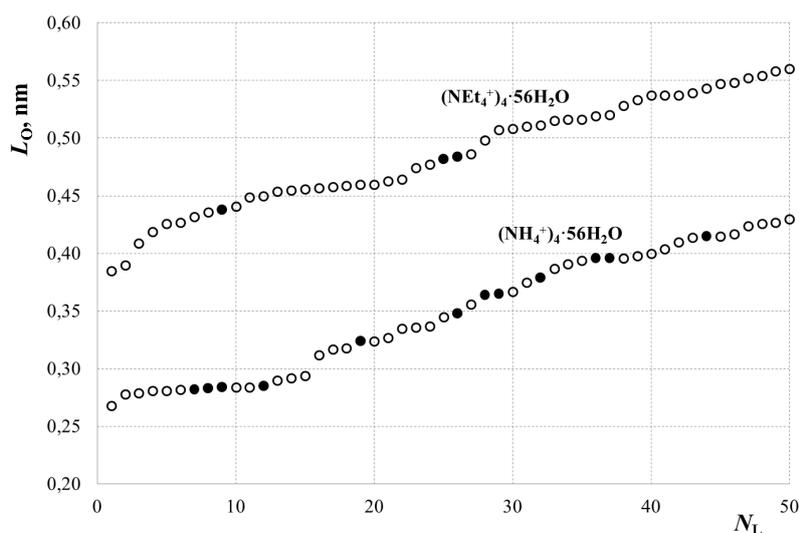


Рис. 1. Диаграммы ранговых распределений атомов кислорода по расстояниям от атомов азота.

Светлые символы относятся к молекулам воды, темные – к карбоксилатным группам

Fig. 1. Diagrams of rank distributions of oxygen atoms by distances from nitrogen atoms.

Light symbols refer to water molecules, dark symbols refer to carboxylate groups

ния L_O , измеренные от каждого атома азота до каждого атома кислорода, сортировались по величине (рангу) с присвоением номера $N_L = 1$ кратчайшему из них и объединялись в один массив данных L_O-N_L , диаграммы которых представлены на рис. 1.

Результаты и их обсуждение. На диаграммах расстояния кислорода воды и карбоксилатной группы обозначены разными символами. Видно, что они образуют общие кривые.

Из диаграмм видно, что карбоксилатные анионы не образуют отдельных групп, а располагаются без видимого порядка между молекулами воды. Диаграмма L_O-N_L кластера $(R-NH_4^+)_4 \cdot 56H_2O$ имеет почти плоский участок, соответствующий 15 приблизительно равноудаленным от атома N атомам кислорода молекул воды (O_w) и карбоксилатных групп (O_c), образующих плотные координационные слои вокруг четырех ионов аммония. Еще один атом кислорода находится в переходном состоянии, которое соответствует его пребыванию в непосредственной близости от катиона в течение некоторой части времени наблюдения. С учетом этой неопределенности можно констатировать, что в координационном слое аммония находится 11 O_w и 4 O_c атомов, и параметр $p_{w1} = 11 / (11 + 4) = 0,73$. Для $i = 1$, в соответствии с принятым алгоритмом выбора параметров в МПГ, вначале выбираем значение $q_i = 1$. Оказалось, что при таком выборе перечисленных параметров кривая сорбции воды, рассчитанная по (1)–(6), практически совпадает с экспериментальными данными, если $\Delta G_{Wi}^0 = -18$ кДж/моль воды, или $\Delta G_{Hi}^0 = -13$ кДж/моль гидрата (рис. 2).

Ион аммония встраивается в структуру воды, практически не нарушая ее. Только одна молекула воды образует с ним гидрат, в котором она связана прочнее, чем с другими молекулами воды в ее окружении. Большая часть воды в карбоксильном ионите в NH_4^+ форме не отличается от объемной воды по этому параметру. Литературные данные о гидратации иона аммония в водных растворах его различных солей (чаще всего хлоридов и сульфатов) сильно различаются между собой и по-разному интерпретируются разными авторами [8–11]. Различия в числах гидратации связаны с отсутствием общепринятого определения понятия «гидрат». Полученные в настоящей работе количественные параметры гидратации относятся к моментальной (не усредненной по времени) структуре кластеров. В случае иона аммония признаком принадлежности молекулы воды к гидрату принимается соблюдение двух условий: (1) достаточно близкое сосед-

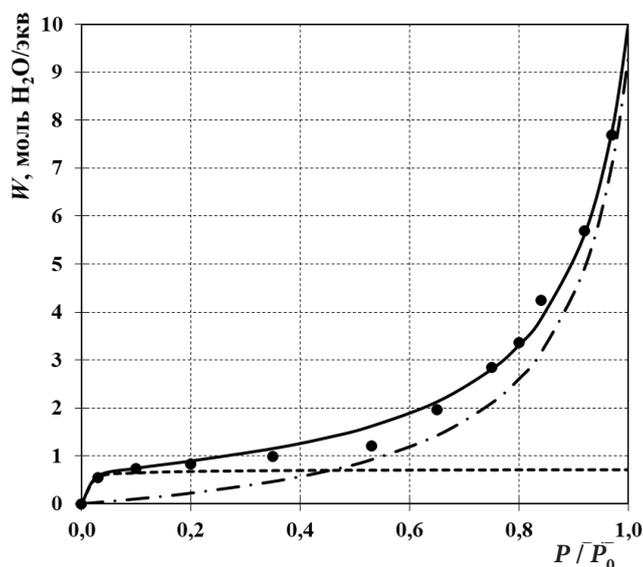


Рис. 2. Изотерма сорбции паров воды NH_4^+ формой ионита из газовой фазы и содержание в ионите гидратной и свободной воды (пунктир и штрих-пунктир). Точки – экспериментальные данные; сплошная линия – общее количество поглощенной воды (расчет по МПГ со следующими параметрами: $i = 1$, $q_i = 1$, $p_{w1} = 0,73$, $\Delta G_{Wi}^0 = -18$ кДж/моль; $W_0 = 10$ моль $H_2O/экв$)

Fig. 2. Isotherm of water vapor sorption by NH_4^+ ionic form of the ion exchanger from the gas phase and the content of hydrated and free water in the ion exchanger (dashed and dash-dotted lines). Points – experimental data; solid line – total amount of absorbed water (calculated by Predominant Hydrates Model (PHM) with the following parameters: $i = 1$, $q_i = 1$, $p_{w1} = 0.73$, $\Delta G_{Wi}^0 = -18$ kJ/mol; $W_0 = 10$ mol H_2O/eq)

ство молекулы воды с гидратирующей частицей и (2) более высокие по абсолютной величине свободные энергии связи молекул воды с частицей, чем с молекулами воды в ее объеме. В случае аммония вокруг его центра могут располагаться 4 атома кислорода, что соответствует его максимальному координационному числу 4. В [12] доказано, что в водных средах две из трех или четырех молекул воды имеют особенно высокие энергии водородных связей с NH_4^+ . Можно предположить, что они расходуются на образование связей с одним из атомов кислорода карбоксилатной группы и одной из ближайших молекул воды. Действительно, оказалось, что из этих четырех O атомов достаточно (и необходимо) учесть только образование моногидрата $\text{H}_3\text{N}^+-\text{H}\cdots\text{OH}_2$, чтобы получить практически точное совпадение теоретической изотермы сорбции с экспериментальной (рис. 2), так как только ее свободная энергия связи с ионом отличается от энергии взаимодействия с молекулами воды, не входящими в гидрат. Несмотря на довольно близкие значения длин водородных связей между ионом аммония и кислородом воды или карбоксилатной группой, они имеют существенное отличие: связь $-\text{N}-\text{H}\cdots\text{O}_c$ имеет значительную долю ковалентности (порядок связи $\text{Bo} \approx 0,10-0,12$), а связи $-\text{N}-\text{H}\cdots\text{O}_w$ чисто ионные ($\text{Bo} < 0,5$).

При расчетах гидратации карбоксильного и сульфокатионитов в формах ионов щелочных металлов [5] мы также обнаруживали во всех случаях образование моногидратов, однако в этих случаях остальные молекулы воды, находящиеся в первом координационном слое катиона, входят в состав второго гидрата. Наличие одной из молекул воды в первом координационном слое, сильнее других связанной с ионом, отражает флюктуации расстояний $\text{I}^+\cdots\text{OH}_2$, и вызванные этим флюктуации ΔG_{H}^0 , которые могут наблюдаться на моментальных снимках структуры кластера, но отсутствовать на усредненных по времени их образах. Таким образом, в данном случае мы получаем в явном виде предполагаемый конкретный образ одной из возможных структур гидрата и его энергетическую характеристику.

Радикально иная ситуация наблюдается при гидратации этого же ионита в форме иона тетраэтиламмония. Ион NEt_4^+ по общепринятым представлениям является гидрофобной заряженной частицей, не способной к сильному взаимодействию с молекулами воды. Диаграмма рангового распределения $L_{\text{O}}-N_L$ атомов кислорода кластера $(\text{R}-\text{Et}_4^+)_4 \cdot 56\text{H}_2\text{O}$ (рис. 1) имеет важные отличия от диаграммы $(\text{R}-\text{NH}_4^+)_4 \cdot 56\text{H}_2\text{O}$. Расстояния от атомов кислорода воды и карбоксилатных групп до центрального атома иона настолько велики, что они не допускают образования водородных связей. Ближайшее расстояние от атома кислорода до атома азота составляет 0,38 нм, что больше, чем расстояние до наиболее удаленного от него атома водорода этильных групп (0,34 нм). Поэтому он является ионом с «плотной» структурой [13], что исключает образование клатратоподобных структур вокруг алкильных групп катиона, как предполагается в [1]. Координационные слои из атомов кислорода вокруг катионов отсутствуют. Поэтому для расчета теоретической изотермы сорбции не может быть применен алгоритм, принятый для аммония и других небольших ионов, образующих контактные гидраты. В этом случае для нахождения параметров МПГ использовался метод свободного подбора параметров. Он проводился от меньшего к большему при соблюдении двух условий: (1) каждый предыдущий преимущественный гидрат должен содержать меньше молекул воды, чем последующий, и (2) его ΔG_{Hi}^0 должно быть больше последующего по абсолютной величине. Параметры, позволившие корректно описать изотерму сорбции в этом случае (рис. 3), оказались следующими: $W_0 = 25$ моль $\text{H}_2\text{O}/\text{экв}$, $p_{w1} = 1$; значения q_i , ΔG_{Hi}^0 (кДж/моль гидрата) и ΔG_{Wi}^0 (кДж/моль воды в гидрате) представлены в таблице.

Параметры МПГ для кластера $(\text{R}-\text{NH}_4^+)_4 \cdot 56\text{H}_2\text{O}$
 PNM parameters for the $(\text{R}-\text{NH}_4^+)_4 \cdot 56\text{H}_2\text{O}$ cluster

i	1	2	3	4
q_i	3	5	8	15
$-\Delta G_{\text{Hi}}^0$	39	55	72	78
$-\Delta G_{\text{Wi}}^0$	13,0	11,0	9,0	5,2

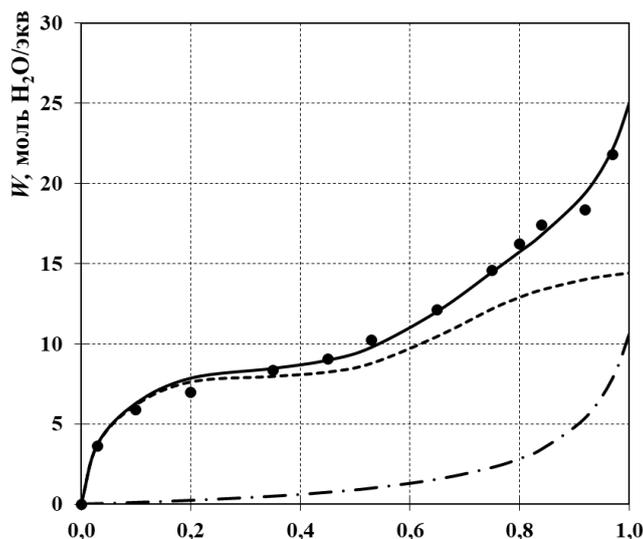


Рис. 3. Изотерма сорбции воды NEt_4^+ формой ионита из газовой фазы и содержание в ионите гидратной и свободной воды (пунктир и штрих-пунктир). Точки – экспериментальные данные; сплошная линия – общее количество поглощенной воды (расчет по МПГ с параметрами в таблице ($p_{w1} = 1$))

Fig. 3. Isotherm of water vapor sorption by NEt_4^+ ionic form of the ion exchanger from the gas phase and the content of hydrated and free water in the ion exchanger (dotted and dash-dotted lines). Points – experimental data; solid line – total amount of absorbed water (calculated by PHM with parameters in table 1 ($p_{w1} = 1$))

Для согласования теоретически рассчитанной и экспериментальной изотерм сорбции воды необходимо допустить, что в ионите образуется не менее четырех преимущественных гидратов, самый маленький и прочный из которых содержит три молекулы воды. Эти гидраты не являются контактными ассоциатами. Вероятно, их параметры следует считать эффективными величинами, отражающими изменение ориентации молекул воды под действием электрического поля полиэлектролита на больших расстояниях. Необходимость учета в явном виде существования близких по составу крупных гидратов с маленькими и близкими свободными энергиями образования, вероятно, связана с полиэлектролитным эффектом практически непрерывного электрического поля полианиона, не приводящего к образованию прямых связей анионных групп с катионами. Вероятно, с этим и связано аномально высокое набухание катионита в форме ионов тетраэтиламмония. Межионные взаимодействия и гидратация ионов – конкурирующие процессы и поэтому слабая гидратация тетраэтиламмония не препятствует сильной гидратации гидрофильных карбоксилатных групп ионита, встраивающихся в структуру воды без ее существенного нарушения.

Заключение. Гидратация ионов в ионите и межионное взаимодействие являются конкурирующими процессами.

Аномально низкое набухание карбоксильного катионита в форме гидрофильного иона NH_4^+ вызвано образованием прочной связи карбоксилатного аниона с аммонием со значительной долей ковалентности за счет наложения кулоновского взаимодействия ионов и образования водородной связи между ними. Это ослабляет его взаимодействие с молекулами воды (гидратация) и приводит к уменьшению количества осмотически активных ионов в ионите, что в совокупности приводит к подавлению набухания ионита.

Аномально высокое набухание ионита в форме иона тетраэтиламмония вызвано отсутствием сильного взаимодействия между этими катионами и карбоксилатными группами из-за невозможности их сближения по стерическим причинам. Высокое набухание ионита вызвано отсутствием блокировки гидрофильных карбоксилатных групп ионита водородными связями с катионом. Катион NEt_4^+ не создает препятствий для их взаимодействия с молекулами воды.

Матрица ионита, являющегося привитым сополимером полиакриловой кислоты и полипропилена, не содержит кросс-агента и не создает пространственного ограничения для высокого набухания ионита. Эффект аномально высокого набухания может не проявляться для ионитов с высокой сетчатостью и жесткой матрицей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Solubilities and Dissolution States of a Series of Symmetrical Tetraalkylammonium Salts in Water / H. Nakayama [et al.] // *Bull. Chem. Soc. Jpn.* – 1989. – Vol. 62, N 4. – P. 985–992. <https://doi.org/10.1246/bcsj.62.985>
2. Marcus, Y. Tetraalkylammonium Ions in Aqueous and Non-aqueous Solutions / Y. Marcus // *J. Solution Chem.* – 2008. – Vol. 37. – P. 1071–1098. <https://doi.org/10.1007/s10953-008-9291-1>
3. Rao, B. G. Hydrophobic Hydration: A Free Energy Perturbation Study / B. G. Rao, U. C. Singh // *J. Am. Chem. Soc.* – 1989. – Vol. 111, N 9. – P. 3125–3133. <https://doi.org/10.1021/ja00191a003>
4. Soldatov, V. S. Hydration of ion exchangers: thermodynamics and quantum chemistry calculations. IV. The state of ions and water molecules in alkali forms of sulfostyrene resins / V. S. Soldatov, E. G. Kosandrovich, T. V. Bezyazychnaya // *React. and Funct. Polym.* – 2018. – Vol. 131. – P. 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2018.07.010>
5. Медяк, Г. В. Особенности получения и свойства волоконистых ионитов ФИБАН К-4 / Г. В. Медяк, А. А. Шункевич, А. П. Поликарпов // *Журн. прикладной химии.* – 2001. – Т. 74, № 10. – С. 1608–1613.
6. Сорбция этиламинов из воздуха волоконистыми ионитами. 2. Слабокислотный карбоксильный катионит ФИБАН К-4 / О. Н. Дорошкевич [и др.] // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук.* – 2014. – № 4. – С. 16–20.
7. Davankov, V. A. Paradoxes of thermodynamics of aqua-vapor-polymer interface equilibrium / V. A. Davankov, A. V. Pastukhov // *Russ. J. Phys. Chem. A.* – 2011. – Vol. 85, N 5. – P. 721–729. <https://doi.org/10.1134/s0036024411050098>
8. Similarities and differences between potassium and ammonium ions in liquid water: a first-principles study / F. Aydin [et al.] // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2020. – N 22. – P. 2540–2548. <https://doi.org/10.1039/c9cp06163k>
9. Szasz, Gy. I. A Molecular dynamics study of aqueous solutions. VIII. Improved simulation and structural properties of a NH_4Cl solution / Gy. I. Szasz, K. Heinzinger // *Z. Naturforsch. A.* – 1979. – Vol. 34, N 7. – P. 840–849. <https://doi.org/10.1515/zna-1979-0708>
10. Cummings, S. The hydration of the ammonium ion in aqueous ammonium sulphate solution as studied by neutron diffraction / S. Cummings // *J. Phys. Colloques.* – 1984. – Vol. 45, N C7. – P. C7-131–C7-135. <https://doi.org/10.1051/jphyscol:1984713>
11. Properties of ammonium ion–water clusters: analyses of structure evolution, noncovalent interactions, and temperature and humidity effects / Shi-Tu Pei [et al.] // *J. Phys. Chem. A.* – 2015. – Vol. 119, N 12. – P. 3035–3047. <https://doi.org/10.1021/jp512323k>
12. Aqueous solution chemistry of ammonium cation in the auger time window / D. Hollas [et al.] // *Sci. Rep.* – 2017. – N 7. – Art. 756. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00756-x>
13. Aqueous solutions of tetraalkylammonium halides: ion hydration, dynamics and ion-ion interactions in light of steric effects / D. Bhowmik [et al.] // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2014. – Vol. 16, N 26. – P. 13447–13457. <https://doi.org/10.1039/c4cp01164c>

References

1. Nakayama H., Kuwata H., Yamamoto N., Akagi Y., Matsui H. Solubilities and dissolution states of a series of symmetrical tetraalkylammonium salts in water. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 1989, vol. 62, no. 4, pp. 985–992. <https://doi.org/10.1246/bcsj.62.985>
2. Marcus Y. Tetraalkylammonium ions in aqueous and non-aqueous solutions. *Journal of Solution Chemistry*, 2008, vol. 37, pp. 1071–1098. <https://doi.org/10.1007/s10953-008-9291-1>
3. Rao B. G., Singh U. C. Hydrophobic hydration: a free energy perturbation study. *Journal of the American Chemical Society*, 1989, vol. 111, no. 9, pp. 3125–3133. <https://doi.org/10.1021/ja00191a003>
4. Soldatov V. S., Kosandrovich E. G., Bezyazychnaya T. V. Hydration of ion exchangers: thermodynamics and quantum chemistry calculations. IV. The state of ions and water molecules in alkali forms of sulfostyrene resins. *Reactive and Functional Polymers*, 2018, vol. 131, pp. 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2018.07.010>
5. Medyak G. V., Shunkevich A. A., Polikarpov A. P., Soldatov V. S. Features of preparation and properties of FIBAN K-4 fibrous sorbents. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2001, vol. 74, pp. 1658–1663. <https://doi.org/10.1023/a:1014849001051>
6. Doroshkevich O. N., Kosandrovich E. G., Kashinskii A. V., Shachenkova L. N., Zelenkovskii V. M. Sorption of ethylamines from air by fibrous ion exchangers. 2. FIBAN K-4, a weak acid cation exchanger. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemistry Series*, 2014, no. 4, pp. 16–20 (in Russian).
7. Davankov V. A., Pastukhov A. V. Paradoxes of thermodynamics of aqua-vapor-polymer interface equilibrium. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2011, vol. 85, no. 5, pp. 721–729. <https://doi.org/10.1134/s0036024411050098>
8. Aydin F., Zhan C., Ritt C., Epsztein R., Elimelech M., Schwegler E., Pham T. A. Similarities and differences between potassium and ammonium ions in liquid water: a first-principles study. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2020, no. 22, pp. 2540–2548. <https://doi.org/10.1039/c9cp06163k>
9. Szasz Gy. I., Heinzinger K. A Molecular dynamics study of aqueous solutions. VIII. Improved simulation and structural properties of a NH_4Cl solution. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 1979, vol. 34, no. 7, pp. 840–849. <https://doi.org/10.1515/zna-1979-0708>
10. Cummings S. The hydration of the ammonium ion in aqueous ammonium sulphate solution as studied by neutron diffraction. *Le Journal de Physique Colloques*, 1984, vol. 45, no. C7, pp. C7-131–C7-135. <https://doi.org/10.1051/jphyscol:1984713>

11. Shi-Tu Pei, Shuai Jiang, Yi-Rong Liu, Teng Huang, Kang-Ming Xu, Hui Wen, Yu-Peng Zhu, Wei Huang. Properties of ammonium ion–water clusters: analyses of structure evolution, noncovalent interactions, and temperature and humidity effects. *Journal of Physical Chemistry A*, 2015, vol. 119, no. 12, pp. 3035–3047. <https://doi.org/10.1021/jp512323k>
12. Hollas D., Pohl M. N., Seidel R., Aziz E. F., Slaviček P., Winter B. Aqueous solution chemistry of ammonium cation in the auger time window. *Scientific Reports*, 2017, no. 7, art. 756. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00756-x>
13. Bhowmik D., Malikova N., Meriguet G., Bernard O., Teixeira J., Turq P. Aqueous solutions of tetraalkylammonium halides: ion hydration, dynamics and ion-ion interactions in light of steric effects. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2014, vol. 16, no. 26, pp. 13447–13457. <https://doi.org/10.1039/c4cp01164c>

Информация об авторах

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

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

Безъязычная Татьяна Владимировна – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kvant@ifoch.bas-net.by.

Information about the authors

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

Kosandrovich Evgenii G. – D. Sc. (Chemistry), Associate Professor, Head of the Laboratory. Institute Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kosandrovich@ifoch.bas-net.by.

Bezyazychnaya Tatiana V. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher. Institute Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kvant@ifoch.bas-net.by.

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

УДК 541.183:544.744
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-473-480>

Поступило в редакцию 07.04.2023
Received 07.04.2023

**С. В. Буча, А. Д. Воробьёв, Д. В. Чередниченко, Е. В. Воробьёва, Е. В. Лаевская,
академик Н. П. Крутько, Г. В. Бондарева**

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

ВЛИЯНИЕ БИНАРНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ НЕИОНОГЕННОГО ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА И АНИОННОГО ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ДИСПЕРСИИ КАРБОНАТОВ КАЛЬЦИЯ И МАГНИЯ

Аннотация. Изучено влияние полиакрилата натрия, полиэтиленгликоля различной молекулярной массы и их смесей на дисперсионную устойчивость карбонатов кальция и магния. Показано, что в присутствии бинарной системы светопропускание дисперсии уменьшается в 1,2–1,5 раза, содержание частиц мелкой фракции возрастает в 1,1–1,3 раза по сравнению с компонентами. Устойчивость дисперсии карбонатов зависит от соотношения компонентов в бинарной системе и их молекулярной массы. Формирование на межфазной границе адсорбционных сольватированных слоев из молекул полиакрилата и полиэтиленгликоля способствует повышению устойчивости дисперсии карбонатов.

Ключевые слова: неионогенное поверхностно-активное вещество, полиакрилат натрия, полиэтиленгликоль, карбонат кальция, карбонат магния, дисперсия, устойчивость, адсорбция

Для цитирования. Влияние бинарной системы на основе неионогенного поверхностно-активного вещества и анионного полиэлектролита на устойчивость дисперсии карбонатов кальция и магния / С. В. Буча [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 6. – С. 473–480. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-473-480>

**Sviatlana V. Bucha, Artem D. Vorobiev, Denis V. Cherednichenko, Elena V. Vorobieva,
Elena V. Laevskaya, Academician Nikolay P. Krutko, Halina V. Bondareva**

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

EFFECT OF A NONIONIC SURFACTANT AND ANIONIC POLYELECTROLYTE BINARY SYSTEM ON THE STABILITY OF A CALCIUM AND MAGNESIUM CARBONATES DISPERSION

Abstract. The effect of sodium polyacrylate, polyethylene glycol of various molecular weights, and their mixtures on the dispersion stability of calcium and magnesium carbonates was studied. It was shown that in the presence of a binary system, the light transmission of the dispersion decreases 1.2–1.5 times, the content of fine fraction particles increases by 1.1–1.3 times compared to the individual components. The stability of the dispersion of carbonates depends on the components ratio in the binary system and their molecular weight. The formation of adsorption solvated layers of polyacrylate and polyethylene glycol molecules at the interphase boundary contributes to an increase in the stability of the carbonate dispersion.

Keywords: nonionic surfactant, sodium polyacrylate, polyethylene glycol, calcium carbonate, magnesium carbonate, dispersion, stability, adsorption

For citation. Bucha S. V., Vorobiev A. D., Cherednichenko D. V., Vorobieva E. V., Laevskaya E. V., Krutko N. P., Bondareva H. V. Effect of a nonionic surfactant and anionic polyelectrolyte binary system on the stability of a calcium and magnesium carbonates dispersion. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 6, pp. 473–480 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-473-480>

Введение. Высокомолекулярные соединения и низкомолекулярные поверхностно-активные вещества (ПАВ), известные как эффективные стабилизаторы дисперсных систем, способные повысить седиментационную и агрегативную устойчивость дисперсий, широко используются в различных областях – при производстве лаков, красок, бумаги, получении эмульсий в пищевой, фармацевтической и косметической промышленности, а также для стабилизации дисперсий карбонатов кальция и магния, образующихся в водооборотных системах охлаждения [1–3]. В [4] показано, что эффективность стабилизации дисперсий карбонатов кальция и магния может быть существенно повышена применением бинарной системы на основе неионогенного ПАВ полиэтиленгликоля и анионного полиэлектролита полиакрилата натрия.

Известно, что к наиболее эффективным высокомолекулярным стабилизаторам дисперсий относятся сополимеры, один компонент которых взаимодействует с поверхностью, другой обладает сродством к дисперсионной среде [5]. Стабилизирующее действие компонентов связано с их адсорбцией на поверхности дисперсной фазы и структурой формирующихся адсорбционных слоев. В бинарной системе на основе полиэтиленгликоля и полиакрилата натрия в состав последнего входят ионогенные группы с зарядом, противоположным заряду частиц дисперсии карбонатов, что способствует взаимодействию полимерного компонента с поверхностью. Полиэтиленгликоль хорошо растворим в дисперсионной среде (вода) и обладает слабым сродством к поверхности карбонатов. Увеличение эффективности стабилизации при использовании бинарной системы на основе полиэтиленгликоля и полиакрилата натрия обусловлено взаимным влиянием компонентов смеси на поверхности частиц дисперсной фазы.

Несмотря на то что многие аспекты влияния ПАВ и полимеров на устойчивость дисперсий хорошо изучены [6; 7], механизм стабилизирующего действия их бинарных систем остается спорным. Это может быть связано с тем, что изучалась, в основном, зависимость устойчивости дисперсий от природы и количества добавляемых реагентов, их молекулярной массы, условий внесения, состава дисперсионной среды, присутствия электролита и других факторов. Адсорбция компонентов бинарной системы, их влияние на двойной электрический слой дисперсной фазы карбонатов, особенности формирующихся адсорбционных слоев изучены недостаточно. Это ограничивает возможности решения практических задач разработки эффективных комплексных стабилизаторов дисперсий осадков карбонатов щелочноземельных металлов, образующихся в водных системах охлаждения на предприятиях химической отрасли.

В настоящем сообщении представлены результаты, характеризующие влияние бинарной системы на основе неионогенного поверхностно-активного вещества и анионного полиэлектролита на устойчивость дисперсии карбонатов кальция и магния.

Материалы и методы исследования. Осаждение карбонатов кальция и магния (далее – карбонатов) проводили при постоянном соотношении $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, равном 3,7. В экспериментах использовали 1,0 М водные растворы CaCl_2 и NaHCO_3 и 0,1 М раствор MgCl_2 , приготовленные из солей квалификации х. ч. Суммарная концентрация ионов кальция и магния в растворе 0,1 М, рН 8,5. Смесь солей перемешивали и нагревали при (80 ± 5) °С в течение 3 ч, образовавшийся осадок отфильтровывали, измельчали (размер частиц менее 0,05 мм), сушили до постоянного веса при (120 ± 5) °С и хранили в эксикаторе.

В работе использовали натриевую соль полиакриловой кислоты (ПА) с различной молекулярной массой (ММ): 1000, 2000, 5100, 8000, 15000, полиэтиленгликоль (ПЭГ) (ММ 400, 2000 и 6000) (Sigma-Aldrich) и их смеси с различным соотношением компонентов. Адсорбцию ПА определяли по разности концентрации полимера в растворе до и после его контакта с дисперсией. Условия опытов были следующие: определенное количество осадка карбонатов диспергировали в 100 мл раствора полимера заданной концентрации, смесь перемешивали в течение 4 ч, полученный осадок отделяли на центрифуге Sigma 3-15 при 5000 об/мин (30 мин). Жидкую фазу анализировали на содержание полиакрилата, используя спектрофотометрическое определение нерастворимой комплексной соли ПА с аминоксодержащим ПАВ (бензетония хлорид).

Для исследования седиментационной устойчивости дисперсий навески образцов (фракция с диаметром частиц 10 мкм) массой 1,0 г помещали в стаканы емкостью 150 мл, заливали дистиллированной водой или раствором ПАВ, полимера или их смеси (99,0 г), перемешивали на магнитной мешалке со скоростью 600 об/мин при температуре (22 ± 2) °С, после чего из стакана с одинаковой глубины отбирали определенное количество дисперсии, переносили в мерную колбу и доводили до 100 мл дистиллированной водой. Значение рН дисперсии регулировали раствором гидроксида натрия. Измерения светопропускания проводили при длине волны 450 нм в стеклянной кювете толщиной 30 мм через каждые 30 мин.

Изображения дисперсии карбонатов получены с использованием электронного сканирующего микроскопа JSM-5610 6LV с системой химического анализа EDXJED-2201 JEOL (Япония). Образцы дисперсии исследовали после перемешивания в течение 4 ч на магнитной мешалке со скоростью 600 об/мин при температуре (20 ± 1) °С в присутствии ПА, ПЭГ и ПА-ПЭГ (1 : 1).

Электрокинетические характеристики растворов полимеров определяли с использованием автоматической установки – микроэлектрофорометра Zetaphoremeter IV фирмы CAD Instrumentation (Франция). Принцип работы прибора основан на измерении электрофоретической подвижности частиц с последующим расчетом величины ζ -потенциала (дзета-потенциал). Расчет осуществляли с использованием программного обеспечения Zeta Cad (CAD Instrumentation, Франция).

Результаты и их обсуждение. Согласно современным представлениям, устойчивость дисперсных систем определяется балансом сил притяжения и отталкивания между частицами. В случае стабилизированных дисперсий к ним можно отнести силы ван-дер-ваальсового притяжения и отталкивания двойных электрических слоев. Адсорбция водорастворимых полимеров заряженными частицами приводит к изменению баланса указанных сил и вызывает появление дополнительных сил отталкивания за счет взаимодействия адсорбированных макромолекул полимеров и появления (или усиления роли) сольватационного фактора устойчивости [8; 9]. Большие размеры молекул, несущих собственные сольватные оболочки, создают на поверхности частиц адсорбционно-сольватные слои большой протяженности и плотности.

Адсорбция макромолекул ПА приводит к изменению параметров двойного электрического слоя (рис. 1). В водной среде на гидратированной поверхности частиц ионы кальция, магния, карбонат- и бикарбонат-ионы взаимодействуют с противоионами. Молекулы ПА, содержащие карбоксилат-ионы (COO^-), способны вытеснить из слоя Штерна часть адсорбированных противоионов. Как видно из рис. 1, ход кривых, характеризующих уменьшение ζ -потенциала частиц при концентрации полимера до 4 мг/л и выход на плато при более высокой концентрации, мало зависит от молекулярной массы полимера.

Форма изотерм адсорбции ПА (рис. 2) с резким подъемом в области низких концентраций полимера свидетельствует об электростатическом характере взаимодействия диссоциированных карбоксильных групп с ионами кальция и магния. Структура (плотность и толщина) адсорбционного слоя определяется числом и длиной сегментов полимерной цепи, не контактирующих с поверхностью. Адсорбционные слои из молекул ПА на разных частицах состоят из сегментов, содержащих функциональные группы с одинаковым зарядом, в связи с чем частицы отталкиваются друг от друга и устойчивость дисперсии возрастает.

Устойчивость дисперсии карбонатов зависит от ММ и концентрации ПА. Использование ПА с ММ 2000 и 5100 при концентрации 0,1 мг/л приводит к увеличению мутности дисперсии и, соответственно, уменьшению светопропускания дисперсии на 22–25 % по сравнению с вариан-

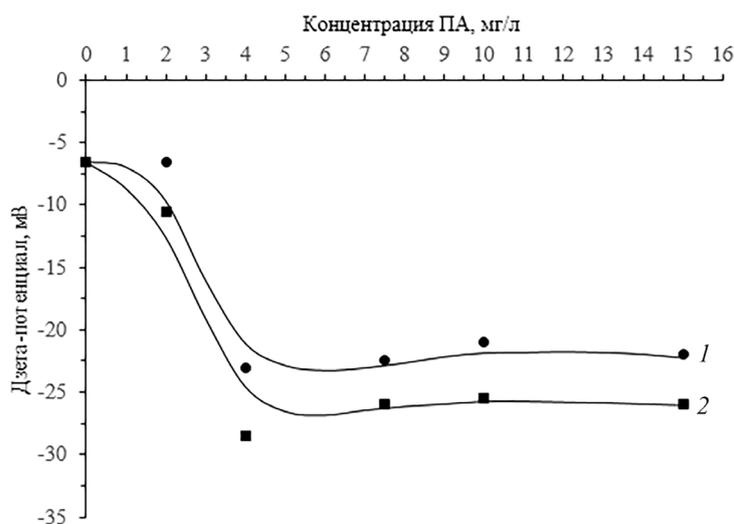


Рис. 1. Электрокинетический потенциал поверхности частиц карбоната кальция и магния при введении ПА с ММ 2000 (1) и 5100 (2)

Fig. 1. Electrokinetic potential of the surface of calcium and magnesium carbonate particles in presence of PA with MM 2000 (1) and 5100 (2)

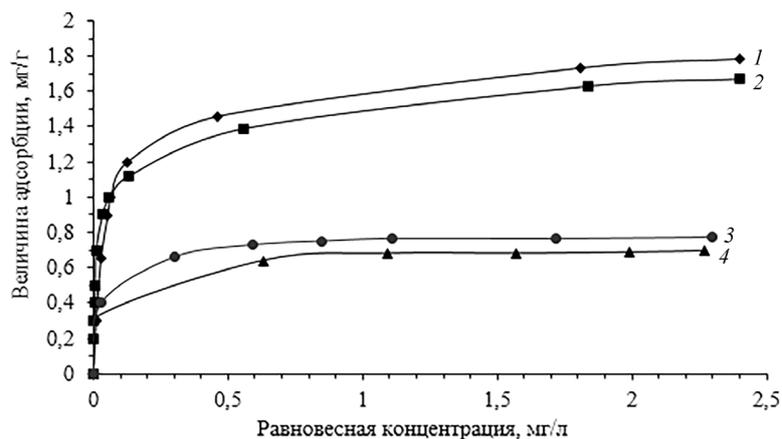


Рис. 2. Адсорбция ПА с ММ 2000 (1); 5100 (2); 8000 (3); 15000 (4)

Fig. 2. Adsorption of PA with MM 2000 (1); 5100 (2); 8000 (3); 15000 (4)

том без добавок (рис. 3). Повышение молекулярной массы ПА способствует образованию более плотного адсорбционного слоя, препятствующего агрегации частиц осадка.

Экспериментально показано, что ПЭГ относительно слабо взаимодействует с поверхностью частиц дисперсии: величина адсорбции для выбранного диапазона концентраций ПЭГ не превышает 0,05–0,10 мг/г и практически не зависит от ММ полимера. Устойчивость дисперсии карбонатов при введении ПЭГ не изменяется, светопропускание не зависит от концентрации ПЭГ.

Введение ПЭГ₂₀₀₀ и ПА₅₁₀₀ приводит к увеличению устойчивости дисперсии карбонатов в большей степени по сравнению с компонентами, о чем свидетельствует отклонение экспериментально полученных данных от линии аддитивности (рис. 4). Обнаруженный синергетический эффект стабилизации дисперсии при введении бинарной системы «ПА–ПЭГ» может быть обусловлен влиянием ПЭГ на адсорбцию ПА. Однако полученные нами экспериментальные данные свидетельствуют об отсутствии такого влияния. В бинарной системе возможно перераспределение адсорбированных сегментов ПА в зоне перекрытия с молекулами ПЭГ на поверхности частиц. В исследуемой системе в адсорбционном слое одинаково вероятны как взаимное проникновение молекул ПА и ПЭГ, так и взаимодействие адсорбированных веществ с растворителем и образование сольватного слоя [10; 11].

Как следует из рис. 4, при введении в дисперсию бинарной системы «ПА–ПЭГ» с увеличением содержания ПЭГ от 20 до 80 % устойчивость дисперсии уменьшается в среднем в 1,4 раза

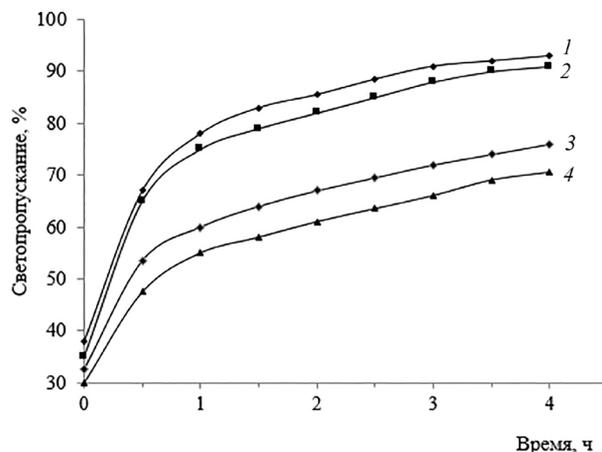


Рис. 3. Светопропускание дисперсии карбонатов в зависимости от времени осаждения: без добавок (1) и в присутствии ПА (0,1 мг/л) с ММ 1000 (2); 2000 (3) и 5100 (4)

Fig. 3. Light transmission of a dispersion of carbonates depending on the deposition time: without additives (1) and in the presence of PA (0.1 mg/l) with MM 1000 (2); 2000 (3) and 5100 (4)

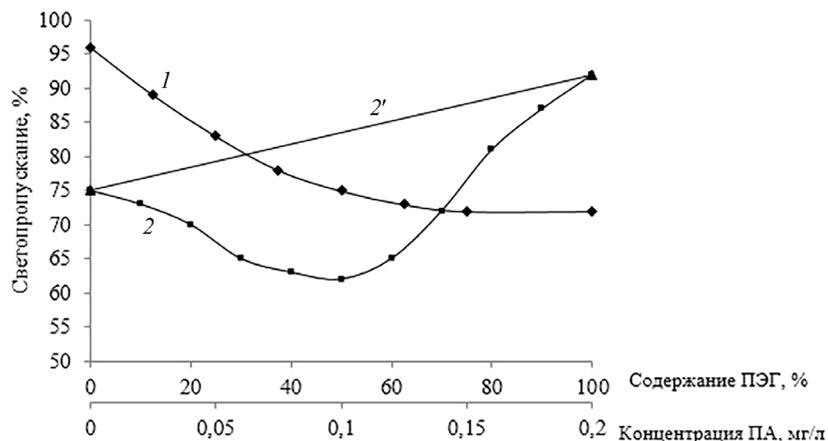


Рис. 4. Светопропускание дисперсии карбонатов в зависимости от концентрации ПА (1) и содержания ПЭГ₂₀₀₀ в смеси с ПА₅₁₀₀ (2 – экспериментальные данные; 2' – линия аддитивности)

Fig. 4. Light transmission of dispersion of carbonates depending on the concentration of PA (1) and the content of PEG₂₀₀₀ in a mixture with PA₅₁₀₀ (2 – experimental data; 2' – additivity line)

по сравнению с ПЭГ и в 1,1 раза по сравнению с ПА. Уменьшение содержания ПЭГ менее 20 % и увеличение более 80 % сопровождается незначительным изменением светопропускания дисперсии по сравнению с компонентами системы в индивидуальном состоянии.

Полиэтиленгликоль, благодаря наличию оксиэтильных и гидроксильных групп и способности к образованию водородных связей, сольватирует поверхность частиц. Адсорбционно-сольватный фактор стабилизации при образовании на межфазной границе полимолекулярных защитных слоев из высокомолекулярных соединений и сольватированных молекул ПАВ [12; 13] способствует повышению устойчивости дисперсии карбонатов.

Влияние бинарной системы «ПА–ПЭГ» на устойчивость дисперсии зависит от молекулярной массы компонентов. Увеличение ММ ПЭГ приводит к уменьшению светопропускания (рис. 5), что свидетельствует о повышении устойчивости дисперсии. Изменение молекулярной массы ПА оказывает более заметное влияние на оптические свойства дисперсии по сравнению с ПЭГ.

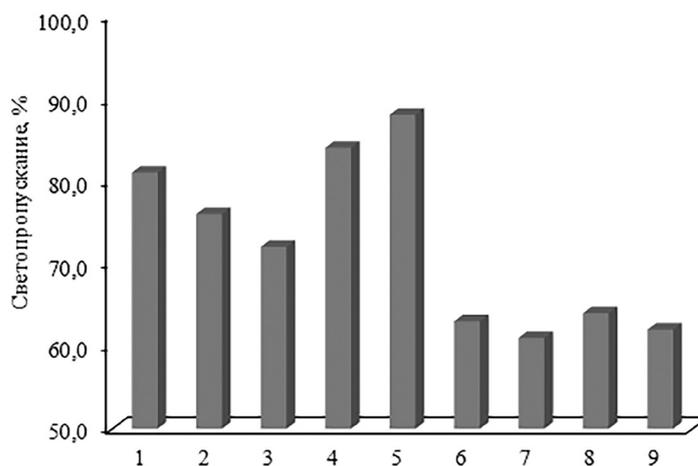


Рис. 5. Светопропускание (через 4 ч) дисперсии карбонатов в присутствии системы «ПА–ПЭГ» (0,1 мг/л; 40 % ПЭГ) в зависимости от ММ компонентов: «ПА₁₀₀₀–ПЭГ₄₀₀» (1); «ПА₂₀₀₀–ПЭГ₄₀₀» (2); «ПА₅₁₀₀–ПЭГ₄₀₀» (3); «ПА₈₀₀₀–ПЭГ₂₀₀₀» (4); «ПА₁₅₀₀₀–ПЭГ₂₀₀₀» (5); «ПА₂₀₀₀–ПЭГ₂₀₀₀» (6); «ПА₅₁₀₀–ПЭГ₂₀₀₀» (7); «ПА₂₀₀₀–ПЭГ₆₀₀₀» (8); «ПА₅₁₀₀–ПЭГ₆₀₀₀» (9)

Fig. 5. Light transmission (after 4 h) of carbonate dispersions in the presence of the “PA–PEG” system (0.1 mg/l; 40 % PEG) depending on the MW of the components: “PA₁₀₀₀–PEG₄₀₀” (1); “PA₂₀₀₀–PEG₄₀₀” (2); “PA₅₁₀₀–PEG₄₀₀” (3); “PA₈₀₀₀–PEG₂₀₀₀” (4); “PA₁₅₀₀₀–PEG₂₀₀₀” (5); “PA₂₀₀₀–PEG₂₀₀₀” (6); “PA₅₁₀₀–PEG₂₀₀₀” (7); “PA₂₀₀₀–PEG₆₀₀₀” (8); “PA₅₁₀₀–PEG₆₀₀₀” (9)

Увеличение светопропускания дисперсии в присутствии ПА с ММ 8000 и 15000 обусловлено флокуляцией частиц макромолекулами ПА и осаждением флокул. Как видно из рис. 5, наиболее высокую эффективность стабилизирующего действия проявляют бинарные системы, содержащие ПЭГ с ММ 2000 и 6000 и ПА с ММ 2000 и 5100.

ПЭГ не оказывает заметного влияния на фракционный состав дисперсии карбонатов (таблица). В присутствии ПА содержание мелких частиц (размер 1–20 мкм) увеличивается по сравнению с дисперсией без добавок в 1,2 раза, крупных частиц (размер 40–100 мкм) уменьшается в 2 раза. В присутствии бинарной системы на основе ПА и ПЭГ содержание мелких частиц с размером 1–20 мкм возрастает в 1,3 раза по сравнению с дисперсией без добавок, в 1,2 раза по сравнению с ПЭГ и в 1,1 раза – с ПА. Влияние системы «ПЭГ–ПА» на фракционный состав осадка карбонатов в большей степени проявляется при содержании ПЭГ в смеси от 30 до 70 %.

Фракционный состав осадка карбонатов в присутствии ПА и ПЭГ (концентрация 0,1 мг/л)
Size distribution of carbonate precipitate in the presence of PA and PEG (concentration 0.1 mg/l)

Наименование добавки	Содержание (%) частиц осадка с размером (мкм)		
	1–20	20–40	40–100
Без добавок	73,4	21,6	5,0
ПА ₅₁₀₀	86,8	10,7	2,5
ПЭГ ₂₀₀₀	75,2	20,3	4,5
Система ПА–ПЭГ, содержащая ПЭГ, %			
30	89,6	9,1	1,3
40	93,5	5,8	0,7
50	94,4	4,8	0,8
60	94,9	4,2	0,9
70	90,7	7,6	1,7

Из фотографий, приведенных на рис. 6, видно, что размер и форма частиц дисперсии при введении ПЭГ и ПА по отдельности отличаются от дисперсии с бинарной системой ПА–ПЭГ. Учитывая аналогичные условия получения образцов дисперсии (время и интенсивность перемешивания, температура) и одинаковое содержание стабилизирующей добавки (0,1 мг/л), можно сделать вывод о том, что формирование мелких круглых агрегатов в присутствии ПА–ПЭГ и их высокое содержание по сравнению с крупными частицами (таблица) может быть обусловлено изменением механизма стабилизирующего действия бинарных систем по сравнению с индивидуальными компонентами.

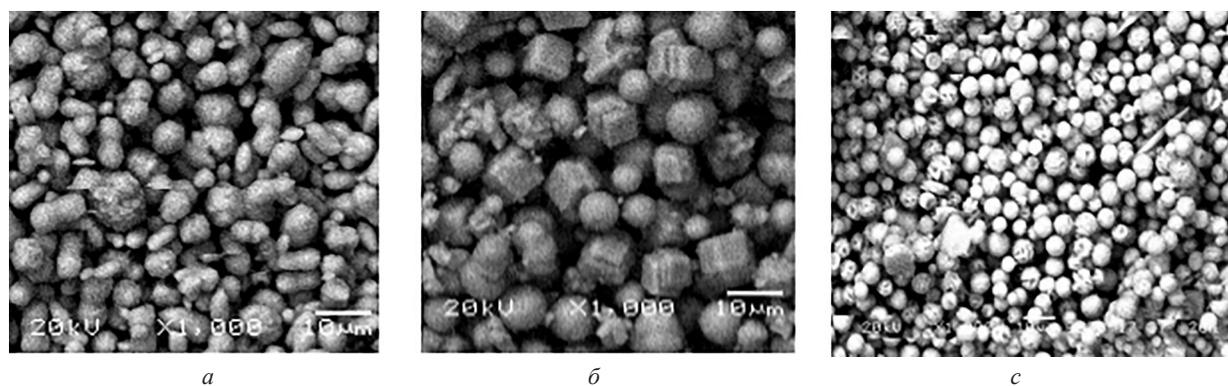


Рис. 6. Фотографии (увеличение в 1000 раз) частиц дисперсии карбонатов в присутствии ПА (а), ПЭГ (б) и ПА–ПЭГ (1 : 1) (с)

Fig. 6. Photographs (1000 times magnification) of carbonate dispersion particles in the presence of PA (a), PEG (b) and PA–PEG (1 : 1) (c)

В исследуемой системе устойчивость дисперсии карбонатов обусловлена действием как структурно-механического, так и адсорбционно-сольватного факторов стабилизации. Адсорбированные молекулы ПА образуют на поверхности частиц структуры, обладающие упругостью и механической прочностью, разрушение которых требует определенной энергии и времени. Молекулы ПЭГ увеличивают прочность стерического барьера, кроме того, вследствие хорошего взаимодействия с растворителем, – сольватной оболочки на поверхности дисперсной фазы. Чем более развита и прочна сольватная оболочка, тем большей потенциальной энергией должны обладать коллоидные частицы для преодоления адсорбционно-сольватного барьера, и тем выше устойчивость дисперсии.

Заключение. Обнаружен синергетический эффект повышения устойчивости водной дисперсии карбонатов кальция и магния в присутствии бинарной системы «ПА–ПЭГ» на основе неионогенного ПАВ полиэтиленгликоля и анионного полиэлектролита полиакрилата натрия. Светопропускание дисперсии уменьшается в 1,2 и в 1,5 раза, а содержание частиц мелкой фракции (1–20 мкм) возрастает в 1,1 и в 1,3 раза по сравнению с ПА и ПЭГ соответственно. Эффект повышения устойчивости в большей степени выражен при соотношении компонентов ПА : ПЭГ = 1 : (0,75–1,25) с молекулярной массой ПА и ПЭГ 2000–6000. Стабилизирующее действие ПА в дисперсии карбонатов обусловлено адсорбцией молекул ПА на поверхности частиц и формированием адсорбционного слоя из сегментов полимерной цепи. При использовании бинарной системы перераспределение адсорбированных сегментов ПА с молекулами ПЭГ на поверхности частиц способствует образованию более плотного адсорбционного слоя, препятствующего агрегации частиц осадка.

Список использованных источников

1. Kovalev, D. M. Nanofoam-like structure of surfactants in oil-water mixtures / D. M. Kovalev, V. S. Kravchenko, I. I. Potemkin // *J. Mol. Liq.* – 2022. – Vol. 360. – P. 119568–119591. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119568>
2. Анисимова, С. В. Стабилизация биоцидных композиций на основе водных дисперсий акриловых сополимеров / С. В. Анисимова // *Лакокрасочная промышленность.* – 2007. – № 2. – С. 2–4.
3. Reddy, M. M. Calcite Crystal Growth Rate Inhibition by Polycarboxylic Acids / M. M. Reddy, A. R. Hoch // *J. Colloid Interface Sci.* – 2001. – Vol. 235, N 2. – P. 365–370. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.7378>
4. Влияние полиакриловой кислоты и полиэтиленгликоля на кристаллизацию карбонатов кальция и магния / И. В. Шестак [и др.] // *Докл. Нац. акад. наук Беларуси.* – 2010. – Т. 54, № 2. – С. 77–81.
5. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах / К. Холмберг [и др.]. – М., 2007. – 528 с.
6. Щукин, Е. Д. Коллоидная химия / Е. Д. Щукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина. – М., 2004. – 445 с.
7. Stability of the dispersed system in inverse emulsion polymerization of ionic acrylate monomers / A. I. Nechaev [et al.] // *Colloid. Polym. Sci.* – 2021. – Vol. 299. – P. 1127–1138. <https://doi.org/10.1007/s00396-021-04832-7>
8. Colloid surfactants for emulsion stabilization / J.-W. Kim [et al.] // *Adv. Mater.* – 2008. – Vol. 20, N 17. – P. 3239–3243. <https://doi.org/10.1002/adma.200800484>
9. Соболева, О. А. Смешанные мицеллы и адсорбционные слои неионогенного поверхностно-активного вещества с катионным (мономерным и димерным) / О. А. Соболева, М. В. Кривобокова // *Вестн. Московского ун-та. Сер. Химия.* – 2004. – Т. 45, № 5. – С. 344–349.
10. Guyomard, A. Buildup of multilayers based on amphiphilic polyelectrolytes / A. Guyomard, G. Muller, K. Glinel // *Macromol.* – 2005. – Vol. 38, N 13. – P. 5737–5742. <https://doi.org/10.1021/ma050867n>
11. Дебриер, Ж. Межфазные свойства амфифильных систем на основе природных полимеров – производных хитина / Ж. Дебриер, В. Г. Бабак // *Рос. хим. журн.* – 2008. – Т. 52, № 1. – С. 75–84.
12. Масимов, Э. А. Вискозиметрическое исследование разбавленных водных растворов полиэтиленгликолей с различной молекулярной массой / Э. А. Масимов, Б. Г. Пашаев, Г. Ш. Гасанов // *Журн. физ. химии.* – 2019. – Т. 93, № 5. – С. 779–781. <https://doi.org/10.1134/s0036024419050224>
13. Полимерные комплексы на основе полиакриловой кислоты, полиэтиленгликоля и поливинилового спирта / Е. В. Воробьева [и др.] // *Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. навук.* – 2008. – № 1. – С. 21–25.

References

1. Kovalev D. M., Kravchenko V. S., Potemkin I. I. Nanofoam-like structure of surfactants in oil-water mixtures. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, vol. 360, pp. 119568–119591. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119568>
2. Anisimova S. V. Stabilization of biocidal compositions based on aqueous dispersions of acrylic copolymers. *Lakokrashchaya promyshlennost' = Paint & Coatings Industry*, 2007, no. 2, pp. 2–4 (in Russian).
3. Reddy M. M., Hoch A. R. Calcite crystal growth rate inhibition by polycarboxylic acids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2001, vol. 235, no. 2, pp. 365–370. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.7378>

4. Shestak I. V., Vorobieva E. V., Basalyha I. I., Krutko N. P., Kulbitskaya L. V. Polyacrylic acid and polyethylene glycol influence on the crystallization of calcium carbonates and magnesium. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2010, vol. 54, no. 2, pp. 77–81 (in Russian).
5. Holmberg K., Jönsson B., Kronberg B., Lindman B. *Surfactants and polymers in aqueous solutions*. Moscow, 2007. 528 p. (in Russian).
6. Shchukin E. D., Percov A. V., Amelina E. A. *Colloid chemistry*. Moscow, 2004. 445 p. (in Russian).
7. Nechaev A. I., Voronina N. S., Valtisfer V. A., Strelnikov V. N. Stability of the dispersed system in inverse emulsion polymerization of ionic acrylate monomers. *Colloid and Polymer Science*, 2021, vol. 299, pp. 1127–1138. <https://doi.org/10.1007/s00396-021-04832-7>
8. Kim J.-W., Lee D., Shum H. C., Weitz D. A. Colloid surfactants for emulsion stabilization. *Advanced Materials*, 2008, vol. 20, no. 17, pp. 3239–3243. <https://doi.org/10.1002/adma.200800484>
9. Soboleva O. A., Krivobokova M. V. Mixed micelles and adsorption layers of nonionic surfactant with monomeric and dimeric cationic surfactants. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 2. Himiya = Bulletin of Moscow University. Chemistry series*, 2004, vol. 45, no. 5, pp. 344–349 (in Russian).
10. Guyomard A., Muller G., Glinel K. Buildup of multilayers based on amphiphilic polyelectrolytes. *Macromolecules*, 2005, vol. 38, no. 13, pp. 5737–5742. <https://doi.org/10.1021/ma050867n>
11. Desbrieres J., Babak V. G. Interfacial properties of amphiphilic systems on the basis of natural polymers-chitin derivatives. *Russian Journal of General Chemistry*, 2008, vol. 78, no. 11, pp. 2230–2238. <https://doi.org/10.1134/s1070363208110443>
12. Masimov E. A., Pashayev B. G., Hasanov H. S. Viscometric study of diluted aqueous solutions of polyethylene glycols of different molecular weights. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2019, vol. 93, no. 5, pp. 988–990. <https://doi.org/10.1134/s0036024419050224>
13. Vorobeva E. V., Krutko N. P., Basalyga I. I., Matrunchik Ju. V. Polymer complexes based on polyacrylic acid, polyethylene glycol and polyvinyl alcohol. *Vestsi Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2008, no. 1, pp. 21–25 (in Russian).

Информация об авторах

Буча Светлана Васильевна – науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: buchala003@gmail.com.

Воробьев Артем Дмитриевич – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: avorobiov@igic.bas-net.by.

Чередниченко Денис Викторович – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: cherednichenko_dv@tut.by.

Воробьева Елена Викторовна – д-р хим. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by.

Лаевская Елена Васильевна – канд. техн. наук, заведующий лабораторией. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: laeuskaya@gmail.com.

Крутко Николай Павлович – академик, д-р хим. наук, профессор, генеральный директор. ГНПО «Химические продукты и технологии» (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: krutko@igic.bas-net.by.

Бондарева Галина Валерьевна – канд. хим. наук, ученый секретарь. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sekretar@igic.bas-net.by.

Information about the authors

Bucha Sviatlana V. – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: buchala003@gmail.com.

Vorobiev Artem D. – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: avorobiov@igic.bas-net.by.

Cherednichenko Denis V. – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: cherednichenko_dv@tut.by.

Vorobieva Elena V. – D. Sc. (Chemistry), Associate Professor, Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by.

Layevskaya Elena V. – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: laeuskaya@gmail.com.

Krutko Nikolay P. – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, General Director. State Research and Production Association «Chemical Products and Technologies» (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: krutko@igic.bas-net.by.

Bondareva Halina V. – Ph. D. (Chemistry), Scientific Secretary. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sekretar@igic.bas-net.by.

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

БИОЛОГИЯ

BIOLOGY

УДК 577.14:577.171.55:616.8-08
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-481-489>

Поступило в редакцию 05.12.2022
Received 05.12.2022

**Н. П. Канунникова^{1,2}, Д. С. Семенович^{1,3}, И. Н. Катковская¹, О. В. Титко¹,
Е. П. Лукиенко¹, В. А. Гуринович¹, член-корреспондент А. Г. Мойсеёнок¹**

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

²*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь*

³*Научно-исследовательский институт физико-химической биологии имени А. Н. Белозерского
Московского государственного университета, Москва, Российская Федерация*

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕДОКС-ДИСБАЛАНСА И ОКИСЛИТЕЛЬНОГО СТРЕССА В ГИППОКАМПЕ ПРИ АЛЮМИНИЕВОМ НЕЙРОТОКСИКОЗЕ И ИНИЦИИРОВАНИИ БИОСИНТЕЗА КОФЕРМЕНТА А

Аннотация. У половозрелых крыс-самок линии Wistar CRL: (WI) WUBR вызывали альцгеймероподобный патологический процесс с использованием хлорида алюминия (200 мг/кг, внутривентрикулярно, 6 недель) с целью моделирования редокс-дисбаланса и окислительного стресса в гиппокампе и оценки возможностей их коррекции двухнедельным назначением модуляторов биосинтеза кофермента А (пантенола, пантетина, гомопантотената в дозе 200 мг/кг, внутривентрикулярно на протяжении 2 недель). На фоне активации процессов перекисного окисления и падения активности ацетилхолинэстеразы (АХЭ) наблюдали снижение восстановительного потенциала глутатиона и уровня кислоторастворимой фракции КоА с одновременным увеличением активности глутатион-метаболизирующих ферментов (GR, GPx, GST), процесса S-глутатионилирования белков и уровня белковых тиолов. Введение предшественников биосинтеза КоА в полной (пантенол, пантетин) или в частичной (гомопантотенат) мере оказывало антиоксидантный эффект, восстанавливало активность АХЭ, уровень и восстановительный потенциал глутатиона и глутатион-метаболизирующих ферментов, процесс S-глутатионилирования и стимулировало активность ферментов, генерирующих НАДФН⁺. С учетом низкого эффекта предшественников кофермента на уровень КоА в гиппокампе и высокую редокс-фармакологическую активность предполагается их внекоферментное действие на редокс-механизмы, приводящие к увеличению биодоступности восстанавливающих эквивалентов и энергетического статуса.

Ключевые слова: окислительный стресс, алюминиевый нейротоксикоз, гиппокамп, глутатион, пентозофосфатный путь, производные пантотеновой кислоты

Для цитирования. Моделирование редокс-дисбаланса и окислительного стресса в гиппокампе при алюминиевом нейротоксикозе и иницировании биосинтеза кофермента А / Н. П. Канунникова [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 6. – С. 481–489. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-481-489>

**Nina P. Kanunnikova^{1,2}, Dmitry S. Semenovich^{1,3}, Inna N. Katkovskaya¹, Oksana V. Titko¹,
Elena P. Lukiyenko¹, Valery A. Gurinovich¹, Corresponding Member Andrey G. Moiseenok¹**

¹*Institute of Biochemistry for Biologically Active Substances of the National Academy of Sciences, Grodno, Republic of Belarus*

²*Yanka Kupala Grodno State University, Grodno, Republic of Belarus*

³*Research Institute of Physical and Chemical Biology named after A. N. Belozersky of the Moscow State University,
Moscow, Russian Federation*

MODELLING THE REDOX IMBALANCE AND OXIDATIVE STRESS IN THE HIPPOCAMPUS AT ALUMINUM NEUROTOXICITY AND INITIATING THE COENZYME A BIOSYNTHESIS

Abstract. An Alzheimer-like pathological process was induced in mature female Wistar CRL: (WI) WUBR rats using aluminum chloride (200 mg/kg, intragastrically, 6 weeks) in order to model redox imbalance and oxidative stress (OS) in the hippocampus and study the possibilities of their correction 2 weekly administration of coenzyme A biosynthesis modulators (panthenol – PL, pantethine – PT, homopantothenate – HP) at a dose of 200 mg/kg intragastrically for 2 weeks). Against the

background of activation of peroxidation processes and a decrease in acetylcholinesterase activity, a decrease in the reduction potential of glutathione and the level of the acid-soluble fraction of CoA was observed with a simultaneous increase in the activity of glutathione-metabolizing enzymes (GR, GPx, GST), the process of S-glutathionylation of proteins and the level of protein thiols. The consumption of the precursors of CoA biosynthesis in full (PL, PT) or in part (HP) had an antioxidant effect, restored the activity of AChE, the level and reduction potential of glutathione and glutathione-metabolizing enzymes, the process of S-glutathionylation, and stimulated the activity of enzymes generating NADPH⁺. Taking into account the low modulating effect of coenzyme precursors on the level of CoA in the hippocampus and their high redox pharmacological activity, their non-coenzymatic effect on redox mechanisms leading to an increase in the bioavailability of reducing equivalents and energy status is assumed.

Keywords: oxidative stress, aluminum neurotoxicosis, hippocampus, glutathione, pentose phosphate pathway, pantothenic acid derivatives

For citation. Kanunnikova N. P., Semenovich D. S., Katkovskaya I. N., Titko O. V., Lukiyenko E. P., Gurinovich V. A., Moiseenok A. G. Modelling the redox imbalance and oxidative stress in the hippocampus at aluminum neurotoxicity and initiating the coenzyme A biosynthesis. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 6, pp. 481–489 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-481-489>

Введение. Одной из релевантных моделей для оценки редокс-статуса ЦНС и возможности его коррекции является алюминиевый нейротоксикоз, реально проявляющийся развитием альцгеймероподобного заболевания и, как показали наши предыдущие исследования [1], приводящий к глубоким нарушениям редокс-статуса белков и системы глутатиона в больших полушариях мозга. Современные представления о роли окислительного стресса (ОС) в патогенезе нейродегенеративной патологии обогащены понятием «редокс-кода», получающим свое наполнение использованием новых или модифицированных моделей заболеваний и применением факторов, относящихся к редокс-фармакологии, мишенью которых являются ключевые факторы антиоксидантной защиты в мозге (глутатион), металлсодержащие структуры и белковые тиолы [2].

Мембранотропные эффекты алюминия были подробно исследованы на эритроцитах [3]. Установлено также, что ионы алюминия (Al³⁺) легко проникают в головной мозг и принимают активное участие в развитии нейродегенеративных процессов в ткани мозга и ухудшении когнитивных функций [4], однако механизмы их действия на изменения окислительно-восстановительного баланса исследованы недостаточно. Алюминий не является редокс-активным металлом, однако способен усиливать прооксидантные свойства ионов железа и меди [5]. Нейротоксическое действие солей алюминия приводит к инициированию ОС, снижению активности ацетилхолинэстеразы в головном мозге, вызывая нарушения функционирования холинергических нейронов, характерные для болезни Альцгеймера (БА) [2]. Токсические эффекты алюминия опосредуются также через нарушения биоэнергетических функций митохондрий, усиление продукции активных форм кислорода и снижение активности антиоксидантных ферментов. Al³⁺ угнетает активность репарационных ферментов ДНК, модулирует сигнальные пути с участием ядерного фактора NF-κB, MAPK-сигнальные пути – p53 и JNK, вызывает снижение активности РНК-полимеразы путем связывания с цинковыми пальцами белковых факторов транскрипции, нарушения в самоагрегации высокофосфорилированных белков цитоскелета (нейрофиламентов) или связанных с ними микротрубочек и белка Aβ, которые участвуют в патогенезе БА [6].

Наряду с патологическими изменениями в больших полушариях, наиболее выраженные морфологические и биохимические изменения при БА отмечаются в гиппокампе [7]. При этом хотя дегенерация гиппокампа наблюдается и при других нейродегенеративных заболеваниях, степень повреждения ткани гиппокампа заметно выше при БА. Гиппокамп играет ключевую роль в консолидации следов памяти, а также обеспечивает способность к нейрогенезу во взрослом состоянии. В пожилом возрасте в первую очередь повреждения гиппокампа ответственны за снижение когнитивных функций, характерное для БА. Хотя этиология БА до настоящего времени не до конца понятна, известно, что в этиопатогенезе БА задействованы нейровоспаление, накопление пептидов Aβ и фосфорилированного тау-белка, а также развитие окислительного стресса [8].

Глутатион (GSH), важнейший эндогенный антиоксидант в головном мозге, присутствует в ЦНС в больших количествах с общим содержанием до 3,4 мкмоль/г и в наибольшей концентрации обнаруживается в глиальных клетках коры [9]. Поглощение глутатиона, преимущественно

синтезируемого на периферии, происходит с высокой скоростью в гипоталамусе, среднем и продолговатом мозге, гиппокампе и коре больших полушарий [7].

Целью настоящего исследования была характеристика системы глутатиона в гиппокампе, который аргументированно относят к нейроструктурам с высоким редокс-ландшафтом и высокой активностью системы биосинтеза кофермента А (КоА), важнейшего кофактора энергетического метаболизма, участника биосинтеза ацетилхолина (в форме ацетил-КоА) и фактора нейропротекции при ряде известных нейродегенеративных процессов [1; 9] и изучение способности производных пантотеновой кислоты нивелировать изменения редокс-статуса и энергетического метаболизма в гиппокампе в условиях алюминиевого нейротоксикоза.

Материалы и методы исследования. Были использованы крысы-самки линии Wistar CRL: (WI) WUBR массой 180–200 г, содержащиеся в стандартных условиях вивария. Все эксперименты с лабораторными животными выполнялись в соответствии с этическими нормами, а также правилами проведения научных работ с использованием экспериментальных животных в научных исследованиях, составленными на основании рекомендаций и требований «Всемирного общества защиты животных (WSPA)» и «Европейской конвенции по защите экспериментальных животных» (Страсбург, 1986).

Для развития алюминиевого нейротоксикоза животным в течение 6 недель ежедневно вводили хлорид алюминия (200 мг/кг, внутривенно) [5]. С 5-й недели эксперимента на протяжении 14 дней ежедневно вводили производные пантотеновой кислоты – D-пантенол (ПЛ), D-пантетин (ПТ) или гомопантотенат кальция (ГПК) по 200 мг/кг, внутривенно. После декапитации крыс извлекали головной мозг и с охлаждением выделяли гиппокамп.

Базальный, спонтанный и Fe^{2+} /аскорбат-индуцированный уровни ТБКРС измеряли в соответствии с методическими указаниями [10]. Общая антиоксидантная активность (ОАОА) определялась по восстановлению катион-радикалов ABTS и выражалась в восстановительных эквивалентах глутатиона [11]. Содержание КоА и его фракций определяли используя метод [12] в нашей модификации.

Содержание общего, восстановленного и окисленного глутатиона определяли ферментативным рециклическим методом с использованием глутатионредуктазы [13]. Активность глутатионпероксидазы (GPx, КФ 1.11.1.9), глутатион-S-трансферазы (GST, КФ 2.5.1.18) и глутатионредуктазы (GR, КФ 1.6.4.2) определяли кинетическими спектрофотометрическими методами [14–16] соответственно. Содержание S-глутатионилированных белков определяли спектрофлуориметрическим методом [17]. Уровень белковых тиолов и дисульфидов измеряли по методу Patsoukis, Georgiou [18]. Активность ферментов пентозофосфатного цикла определяли в соответствии с указаниями Ninfali и соавт. [19]. Измерение общего белка проводили методом Брэдфорда.

Экспериментальные данные подвергались статистической обработке с использованием программ Microsoft Excel 2016, GraphPad Prism 6.0 и были представлены в виде $M \pm SD$, где M – среднее значение, SD – стандартное отклонение. Использован однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с применением теста Тьюки и установлением статистически значимых различия при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. О развитии ОС и происходящей в гиппокампе животных с нейротоксикозом активации перекисного окисления липидов (ПОЛ) свидетельствует повышение исходного уровня свободных ТБКРС (на 18 %), спонтанно-индуцированного (на 45 %) и особенно Fe^{2+} /аскорбат-индуцированного (на 49 %) содержания конечных продуктов ПОЛ (табл. 1). При этом отмечалось снижение общей антиоксидантной активности на 22 %. Назначение пантенола, пантетина и ГПК способствовало снижению базального уровня ТБКРС, тогда как в отношении индукции образования свободнорадикальных продуктов и общей антиоксидантной активности корректирующее влияние ГПК и отчасти пантетина было менее выраженным, чем в случае применения ксенобиотического предшественника КоА – пантенола.

Основные структуры мозга, в которых происходят явления нейродегенерации в ходе развития болезни Альцгеймера – это большие полушария и гиппокамп, т. е. те структуры, в которых наблюдаются наиболее заметные морфологические изменения [3]. В настоящем исследовании установлено, что в гиппокампе наблюдалось значительное угнетение активности АХЭ, которая

снизилась на 44 %, что является маркером нарушения нейромедиаторных процессов возбуждения на фоне алюминиевого нейротоксикоза (табл. 1). Активность СДГ оказалась повышенной (на 28 %) на фоне действия хлорида алюминия, что подтверждает ранее полученные данные о митохондриальных нарушениях при алюминиевом нейротоксикозе [1] и, как следует из табл. 1, нормализуется до значений в контрольной группе при действии всех изученных производных пантотената.

Т а б л и ц а 1. Содержание ТБКРС, общая антиоксидантная активность, активность ацетилхолинэстеразы (АХЭ) и сукцинатдегидрогеназы (СДГ) в гиппокампе мозга крыс после воздействия хлорида алюминия и введения производных пантотеновой кислоты ($M \pm SD$, $n = 7$)

Table 1. The TBARS level, total antioxidant activity (TAOA), activities of acetylcholinesterase (AChE) and succinate dehydrogenase (SDH) in the rat brain hippocampus after exposure to aluminum chloride and administration of pantothenic acid derivatives ($M \pm SD$, $n = 7$)

Экспериментальная группа Experimental group	ТБК-реагирующие субстраты, мкмоль/мг белка TBARS, $\mu\text{mol}/\text{mg protein}$			ОАОА, нмоль экв. GSH/мг белка TAOA, nmol equiv. GSH/mg protein	АХЭ, нмоль ацетилтиохолина йодида /мин/мг белка AChE, nmol acetylthiocholine iodide/min/mg protein	СДГ, нмоль/мг белка/мин SDH, nmol/mg protein/min
	Базальный уровень Basal level	Спонтанно-индуцированный уровень Spontaneously induced level	Fe ²⁺ /аскорбат-индуцированный уровень Fe ²⁺ /ascorbate-induced level			
Контроль	1,25 ± 0,07	4,80 ± 0,50	12,85 ± 0,64	53,87 ± 0,65	9,50 ± 0,50	30,5 ± 1,7
AlCl ₃	1,47 ± 0,05*	6,95 ± 0,68*	19,20 ± 0,62*	42,21 ± 0,38*	5,30 ± 0,60*	39,1 ± 1,6*
AlCl ₃ +ПЛ AlCl ₃ +PL	1,28 ± 0,08#	5,08 ± 0,56#	13,48 ± 0,49#	48,66 ± 0,47#	8,70 ± 0,57#	31,1 ± 1,9#
AlCl ₃ +ПТ AlCl ₃ +PT	1,32 ± 0,05#	5,83 ± 0,41*	13,93 ± 0,68*#	47,87 ± 0,59#	7,63 ± 0,57#	34,3 ± 1,6#
AlCl ₃ +ГПК AlCl ₃ +HP	1,27 ± 0,07#	6,15 ± 0,60*	15,98 ± 0,51*#	44,94 ± 0,74*	8,98 ± 0,80#	32,7 ± 1,2#

Примечание: * – $p < 0,05$ по отношению к контролю, # – $p < 0,05$ по отношению к AlCl₃.
Notes: * – $p < 0.05$ compared to control, # – $p < 0.05$ compared to AlCl₃.

Обращает на себя внимание тот факт, что введение пантенола и ГПК в равной степени способствовало восстановлению активности АХЭ, тогда как действие пантетина было значительно слабее. Аналогичный эффект выявлен в отношении СДГ (табл. 1).

Согласно представленным данным, хроническое введение хлорида алюминия приводит к выраженному падению содержания свободного КоА в гиппокампе, тогда как уровень ацетил-КоА остался стабильным (табл. 2). Наблюдалась тенденция к росту соотношения ацетил-КоА/КоА-SH, по всей вероятности, отражающая адаптивное увеличение фракции субстрата биосинтеза ацетилхолина в условиях угнетения холинэстеразы (табл. 1). Введение ПЛ на фоне хлорида алюминия привело к некоторому повышению уровня свободного КоА, но наиболее выраженным оказалось влияние ПТ, назначение которого вернуло содержание КоА практически до значений в контроле. Несколько неожиданным оказался эффект ГПК (ингибитора пантотенаткиназы), который проявил эффект, аналогичный действию пантенола. Уровень ацетил-КоА при действии всех изученных нами производных пантотената достоверно не изменился, хотя обнаружилась тенденция к росту этого показателя при назначении ПЛ. Также обращает на себя внимание полная нормализация соотношения ацетил-КоА/КоА-SH в гиппокампе животных, получивших ПТ.

Основным компонентом пула небелковых тиолов и дисульфидов в поддержании редокс-баланса в ЦНС и, в частности, в гиппокампе является система глутатиона. Показано, что 6-недельное введение хлорида алюминия привело к падению уровня восстановленного глутатиона и значительному увеличению содержания его окисленной формы в гиппокампе (табл. 3). При этом происходит сопутствующее уменьшение соотношения GSH/GSSG, свидетельствующее о снижении восстановительного потенциала системы глутатиона в условиях алюминиевого нейротоксикоза, что связано, очевидно, с развитием и активацией ПОЛ. Предшественники биосинтеза КоА при назначении в курсовой дозе ПЛ и ПТ способствовали практически полной нормализации

ции уровня и соотношения окисленной и восстановленной форм глутатиона во всех изученных структурах мозга. При этом эффект ГПК отличался от эффекта других препаратов тем, что он в меньшей степени способствовал увеличению уровня GSH и восстановлению соотношения GSH/GSSG.

Таблица 2. Содержание свободного КоА-SH и ацетил-КоА (нмоль/г ткани) в гиппокампе мозга крыс после воздействия хлорида алюминия и введения производных пантотеновой кислоты ($M \pm SD$, $n = 7$)

Table 2. The content of free CoA-SH and acetyl-CoA (nmol/g tissue) in the rat brain hippocampus after exposure to aluminum chloride and administration of pantothenic acid derivatives ($M \pm SD$, $n = 7$)

Экспериментальная группа Experimental group	КоА-SH CoA-SH	Ацетил-КоА Acetyl-CoA	Ацетил-КоА/КоА-SH Acetyl-CoA/CoA-SH
Контроль	18,11 ± 0,51	8,94 ± 0,48	0,50 ± 0,09
AlCl ₃	14,68 ± 1,14*	8,67 ± 0,99	0,61 ± 0,17
AlCl ₃ +ПЛ AlCl ₃ +PL	15,84 ± 0,58	10,39 ± 0,86	0,66 ± 0,15
AlCl ₃ +ПТ AlCl ₃ +PT	17,79 ± 0,30#	8,79 ± 0,67	0,50 ± 0,12
AlCl ₃ +ГПК AlCl ₃ +HP	16,20 ± 0,73	8,81 ± 0,72	0,55 ± 0,11

Примечания: * – $p < 0,05$ по отношению к контролю, # – $p < 0,05$ по отношению к AlCl₃.
Notes: * – $p < 0.05$ compared to control, # – $p < 0.05$ compared to AlCl₃.

Таблица 3. Показатели системы глутатиона и белковых тиолов и дисульфидов в гиппокампе мозга крыс после воздействия хлорида алюминия и введения производных пантотеновой кислоты ($M \pm SD$, $n = 7$)

Table 3. The parameters of glutathione system and protein thiols and disulfides in the rat brain hippocampus after exposure to aluminum chloride and administration of pantothenic acid derivatives ($M \pm SD$, $n = 7$)

Показатель Parameter	Контроль Control	AlCl ₃	AlCl ₃ +ПЛ AlCl ₃ +PL	AlCl ₃ +ПТ AlCl ₃ +PT	AlCl ₃ +ГПК AlCl ₃ +HP
Содержание (нмоль/мг белка) восстановленного и окисленного глутатиона и его редокс-соотношение The content (nmol/mg of protein) of reduced and oxidized glutathione and its redox ratio					
GSH	27,3 ± 0,9	18,4 ± 0,7*	27,1 ± 0,8#	25,6 ± 0,8#	22,5 ± 0,8*#
GSSG	0,111 ± 0,005	0,116 ± 0,004	0,113 ± 0,003	0,114 ± 0,003	0,115 ± 0,002
GSH/GSSG	247,5 ± 23,8	157,9 ± 6,9*	240,8 ± 12,4#	225,3 ± 7,9#	175,93 ± 14,1*
Содержание S-глутатионилированных белков (нмоль/мг белка) The content of S-glutathionylated proteins (nmol/mg of protein)					
PSSG	0,253 ± 0,036	0,281 ± 0,045*	0,257 ± 0,039#	0,240 ± 0,022#	0,240 ± 0,022#
Активность ключевых ферментов окислительно-восстановительных превращений глутатиона (нмоль/мин/мг белка) Activity of key enzymes of redox transformations of glutathione (nmol/min/mg of protein)					
GR	11,9 ± 0,6	15,4 ± 0,7*	11,3 ± 0,8#	11,9 ± 1,0#	12,3 ± 1,1#
GPx (tBHP)	30,1 ± 1,0	44,5 ± 1,2*	38,8 ± 0,9*#	40,1 ± 1,0*#	37,3 ± 1,2*#
GST	81,2 ± 1,1	95,7 ± 1,1*	83,6 ± 1,1#	88,4 ± 1,2*#	89,4 ± 1,6*#
Содержание белковых тиолов и дисульфидов (мкмоль/г ткани) и их соотношение The content of protein thiols and disulfides and its redox ratio (μmol/g of tissue)					
PSH	6,86 ± 0,93	12,78 ± 0,67*	10,26 ± 0,41*#	11,60 ± 0,72*#	12,60 ± 0,56*
PSSP	3,13 ± 0,49	2,47 ± 0,43	1,73 ± 0,48*	1,35 ± 0,48*#	1,83 ± 0,36*
PSH/PSSP	2,37 ± 0,37	5,36 ± 0,75*	7,76 ± 0,50*#	9,41 ± 1,54*#	6,86 ± 0,70*

Примечания: * – $p < 0,05$ по отношению к контролю, # – $p < 0,05$ по отношению к AlCl₃.
Notes: * – $p < 0.05$ compared to control, # – $p < 0.05$ compared to AlCl₃.

Изучение содержания белковых тиолов и дисульфидов на фоне введения хлорида алюминия показало, что в гиппокампе наблюдалось значительное увеличение содержания белковых форм тиолов без достоверного снижения дисульфидных форм, что привело к значительному повышению соотношения PSH/PSSP (табл. 3). Введение производных пантотеновой кислоты не способствовало восстановлению белкового тиол-дисульфидного баланса и, более того, отмечено дальнейшее снижение белковых дисульфидов, что привело к значительному росту соотношения PSH/PSSP.

Сдвиги в системе глутатиона сопровождались изменениями активности ферментов, контролирующих его окислительно-восстановительный статус (табл. 3). Следует отметить выраженные изменения активности данных ферментов в гиппокампе, в котором наблюдали повышенную активность GPx, GST, а также GR. Это может быть показателем того, что основной вклад в наблюдаемое нами снижение содержания GSH на фоне действия хлорида алюминия вносит основной фермент, окисляющий глутатион, – GPx. Введение ПЛ и ПТ способствовало возвращению активности ферментов к значениям, близким к таковым в контрольной группе.

Действие хлорида алюминия привело также к достоверному увеличению содержания S-глутатионилированных белков в гиппокампе, что, очевидно, является показателем повышения посттрансляционной модификации белков глутатионом в условиях сдвига тиол-дисульфидного баланса (табл. 3). Введение всех изученных нами производных пантотеновой кислоты привело к существенному снижению содержания S-глутатионилированных белков во всех экспериментальных группах до уровня нормальных значений.

Изучение активности ферментов окислительного этапа пентозофосфатного пути в гиппокампе выявило их активацию (на 34 и 20 % соответственно) (табл. 4). Введение производных пантотеновой кислоты привело к возвращению активности обоих ферментов до значений в контрольной группе или близких к ним, при этом эффективность ГПК оказалась наиболее выраженной. Это является подтверждением наблюдаемого нами ранее феномена потенцирования производными пантотеновой кислоты окислительной ветви пентозофосфатного цикла в больших полушариях мозга при алюминиевом нейротоксикозе [1].

Таблица 4. Активность ферментов окислительного этапа пентозофосфатного пути (нмоль НАДФН/мг белка/мин) в гиппокампе мозга крыс после воздействия хлорида алюминия и введения производных пантотеновой кислоты ($M \pm SD$, $n = 7$)

Table 4. Enzyme activity of the oxidative path of the pentose phosphate pathway (nmol NADPH/mg protein/min) in the rat brain hippocampus after exposure to aluminum chloride and administration of pantothenic acid derivatives ($M \pm SD$, $n = 7$)

Экспериментальная группа Experimental group	Глюкозо-6-фосфатдегидрогеназа Glucose-6 phosphate dehydrogenase	6-фосфоглюконат-дегидрогеназа 6-phosphogluconate dehydrogenase
Контроль	22,7 ± 1,3	25,2 ± 1,0
AlCl ₃	30,5 ± 1,5*	30,3 ± 1,4*
AlCl ₃ +ПЛ AlCl ₃ +PL	25,9 ± 1,1#	25,4 ± 1,1#
AlCl ₃ +ПТ AlCl ₃ +PT	25,7 ± 1,4#	27,1 ± 1,3#
AlCl ₃ +ГПК AlCl ₃ +HP	23,8 ± 1,4#	25,4 ± 1,1#

Примечания: * – $p < 0,05$ по отношению к контролю, # – $p < 0,05$ по отношению к AlCl₃.

Notes: * – $p < 0.05$ compared to control, # – $p < 0.05$ compared to AlCl₃.

Как следует из результатов настоящего исследования, для алюминиевого нейротоксикоза характерно нарушение редокс-системы глутатиона в гиппокампе, проявившееся значительным падением уровня GSH и соотношения GSH/GSSG при одновременной активации ферментов его метаболизма (GR, GPx, GST). Наблюдаемый рост фракции S-глутатионилированных белков отражает общий редокс-дисбаланс, характеризующийся резким увеличением SH-групп белков

и их соотношения с белковыми дисульфидами (табл. 3). Вводимые предшественники КоА оказались способны полностью нормализовать редокс-статус глутатиона (в меньшей мере при назначении ГПК), процесс S-глутатионилирования белков, активность GR и GST (менее выражено GRx), но не восстановить (и даже усугубить) тиол-дисульфидный баланс в ткани гиппокампа. Судя по активности маркерных ферментов АХЭ и СДГ, защитный эффект предшественников КоА проявляется в полной мере (табл. 1), равно как и их способность сдерживать в условиях иницирования биосинтеза кофермента перекисное окисление липидов и манифестацию ОС [18]. Избранная модель альцгеймероподобной патологии впервые продемонстрировала падение уровня КоА-SH в гиппокампе и лишь частичное его восстановление при назначении предшественников (табл. 2). С учетом антикоферментных свойств ГПК – конкурентного ингибитора пантотенаткиназы (ключевого фермента биосинтеза КоА), есть все основания полагать, что механизм действия производных пантотеновой кислоты и вовлечение системы биосинтеза КоА вовсе не означает значимость только КоА и его ацил-производных в процессах нейродегенерации и антистрессорной активности. Достаточно упомянуть процессы сигналинга (p53) с участием дефосфо-КоА, существование посттрансляционной модификации белков, опосредованной 4'-фосфо-пантетеином, тиол-дисульфидного взаимодействия редокс-пары пантетин-пантетеин, ассоциированной с процессом гидролиза КоА внеклеточной пантетеиназой [19]. Обращает на себя внимание восстановление предшественниками КоА в гиппокампе активности ферментов окислительного звена пентозофосфатного цикла (табл. 4) – главного источника восстановительных эквивалентов для анаболических реакций синтеза жирных кислот, «окислительного взрыва» и глутатионредуктазной реакции. Если возвратиться к более раннему понятию «редокс-кода» [2], следует исходить из контролируемого ответа организма на стрессорный или иной возмущающий агент (токсикоз), связанного с доступностью восстанавливающих эквивалентов (НАДФН, НАДН) и энергетическим статусом. Не вызывает сомнения факт потенциального восстановления доступности НАДФН при назначении производных пантотеновой кислоты, что подтверждает результаты, описанные в [1]. Тем самым ОС позиционируется как состояние, обусловленное нарушением регуляции передач окислительно-восстановительных сигналов [7; 8]. В действительности все обстоит значительно сложнее, вовлекая в механизмы ОС окислительно-восстановительную систему химических взаимодействий реактивных частиц RSS, RNS, ROS и их биологических мишеней, как и газотрансмиттеров NO, H₂S, CO, COS [2; 4; 7; 18; 19]. Все это является компонентами редокс-ландшафта и может вносить свой вклад в предпринятую нами попытку его модулирования в условиях алюминиевого нейротоксикоза. В данной модели удалось воспроизвести феномен падения в ткани мозга содержания КоА и изменений редокс-статуса системы глутатиона, обнаруженные нами ранее в других моделях нейродегенерации и подтверждающие важную роль систем КоА и глутатиона в поддержании редокс-баланса в ткани мозга. Полученные результаты обосновывают возможности и мишени действия модуляторов биосинтеза КоА как антиоксидантных, редокс-модулирующих и нейропротекторных факторов с определенной перспективой клинического применения.

Список использованных источников

1. Кофермент А, ацил-КоА и система глутатиона в структурах ЦНС при введении гомопантотената и алюминивом нейротоксикозе / А. Г. Мойсеёнок [и др.] // Нейрохимия. – 2010. – Т. 27, № 1. – С. 36–39.
2. Oxidative stress in neurodegenerative diseases: from molecular mechanisms to clinical applications / Z. Liu [et al.] // Oxidative Medicine and Cellular Longevity. – 2017. – Vol. 2017. – Art. 2525967. <https://doi.org/10.1155/2017/2525967>
3. Лукьяненко, Л. М. Влияние ионов алюминия на биофизические параметры мембран эритроцитов / Л. М. Лукьяненко, А. С. Скоробогатова, Е. И. Слобожанина // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2010. – № 2. – С. 55–58.
4. К вопросу о роли алюминия в развитии деменций / Н. А. Гресь [и др.] // Новости мед.-биол. наук. – 2014. – № 3. – С. 70–78.
5. Kumar, V. Aluminium neurotoxicity: neurobehavioural and oxidative aspects / V. Kumar, K. D. Gill // Arch. Toxicol. – 2009. – Vol. 83, N 11. – P. 965–978. <https://doi.org/10.1007/s00204-009-0455-6>
6. Apoptosis and oxidative stress in neurodegenerative diseases / E. Radi [et al.] // J. Alzheimers Dis. – 2014. – Vol. 42, N 3. – P. S125–S152. <https://doi.org/10.3233/jad-132738>

7. Hippocampus and its involvement in Alzheimer's disease: a review / Y. L. Rao [et al.] // *Biotech.* – 2022. – Vol. 12, N 2. – Art. 55. <https://doi.org/10.1007/s13205-022-03123-4>
8. A critical evaluation of neuroprotective and neurodegenerative MicroRNAs in Alzheimer's disease / P. H. Reddy [et al.] // *Biochem. Biophys. Res. Commun.* – 2017. – Vol. 483, N 4. – P. 1156–1165. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2016.08.067>
9. Johnson, W. M. Dysregulation of glutathione homeostasis in neurodegenerative diseases / W. M. Johnson, A. L. Wilson-Delfosse, J. J. Mieyal // *Nutrients.* – 2012. – Vol. 4, N 10. – P. 1399–1440. <https://doi.org/10.3390/nu4101399>
10. Comparison of spectrophotometric and HPLC methods for determination of lipid peroxidation products in rat brain tissues / M. Ďurfinová [et al.] // *Chem. Pap.* – 2007. – Vol. 61, N 4. – P. 321–325. <https://doi.org/10.2478/s11696-007-0040-5>
11. Erel, O. A novel automated direct measurement for total antioxidant capacity using a new generation, more stable ABTS radical cation / O. Erel // *Clin. Biochem.* – 2004. – Vol. 37, N 4. – P. 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2003.11.015>
12. Rahman, I. Assay for quantitative determination of glutathione and glutathione disulfide levels using enzymatic recycling method / I. Rahman, A. Kode, S. K. Biswas // *Nat. Protoc.* – 2006. – Vol. 1. – P. 3159–3165. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.378>
13. Tsuchiya, Y. Methods for measuring CoA and CoA derivatives in biological samples / Y. Tsuchiya, U. Pham, I. Gout // *Biochem. Soc. Trans.* – 2014. – Vol. 42, N 4. – P. 1107–1111. <https://doi.org/10.1042/bst20140123>
14. Flohé, L. Assays of glutathione peroxidase / L. Flohé, W. A. Günzler // *Methods Enzymol.* – 1984. – Vol. 105. – P. 114–120. [https://doi.org/10.1016/s0076-6879\(84\)05015-1](https://doi.org/10.1016/s0076-6879(84)05015-1)
15. Habig, W. H. Glutathione S-transferases. The first enzymatic step in mercapturic acid formation / W. H. Habig, M. J. Pabst, W. B. Jakoby // *J. Biol. Chem.* – 1974. – Vol. 249, N 22. – P. 7130–7139. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(19\)42083-8](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(19)42083-8)
16. Smith, I. K. Assay of glutathione reductase in crude tissue homogenates using 5,5'-dithiobis(2-nitrobenzoic acid) / I. K. Smith, T. L. Vierheller, C. A. Thorne // *Anal. Biochem.* – 1988. – Vol. 175, N 2. – P. 408–413. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(88\)90564-7](https://doi.org/10.1016/0003-2697(88)90564-7)
17. Menon, D. A fluorometric method to quantify protein glutathionylation using glutathione derivatization with 2,3-naphthalenedicarboxaldehyde / D. Menon, P. G. Board // *Anal. Biochem.* – 2013. – Vol. 433, N 2. – P. 132–136. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2012.10.009>
18. Patsoukis, N. Determination of the thiol redox state of organisms: new oxidative stress indicators / N. Patsoukis, C. D. Georgiou // *Anal. Bioanal. Chem.* – 2004. – Vol. 378. – P. 1783–1792. <https://doi.org/10.1007/s00216-004-2525-1>
19. Ninfali, P. Methods for studying the glucose-6-phosphate dehydrogenase activity in brain areas / P. Ninfali, G. Aluigi, A. Pompella // *Brain Research Protocols.* – 1997. – Vol. 1, N 4. – P. 357–363. [https://doi.org/10.1016/s1385-299x\(97\)00011-1](https://doi.org/10.1016/s1385-299x(97)00011-1)

References

1. Moiseenok A. G., Omel'yanchik S. N., Sheval'e A. A., Katkovskaya I. N., El'chaninova M. A., Pekhovskaya T. A., Kovalenchik I. L. Coenzyme A, acyl-CoA, and the glutathione system in CNS structures exposed to homopantothenate or in aluminum neurotoxicity. *Neurochemical Journal*, 2010, vol. 4, no. 1, pp. 30–34. <https://doi.org/10.1134/s181971241001006x>
2. Liu Z., Zhou T., Ziegler A. C., Dimitrion P., Zuo L. Oxidative stress in neurodegenerative diseases: from molecular mechanisms to clinical applications. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2017, vol. 2017, art. 2525967. <https://doi.org/10.1155/2017/2525967>
3. Lukyanenko L. M., Skorobogatova A. S., Slobozhanina E. I. Aluminum ions influence on biophysics parameters of erythrocyte membranes. *Vesti Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya byalagichmykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2010, no. 2, s. 55–58 (in Russian).
4. Gres N. A., Skorobogatova A. S., Zubritskaja G. P., Slobozhanina E. I. On the issue of the role of aluminum in the development of dementia. *Novosti mediko-biologicheskikh nauk = News of Biomedical Sciences*, 2014, no. 3, pp. 70–78 (in Russian).
5. Kumar V., Gill K. D. Aluminium neurotoxicity: neurobehavioural and oxidative aspects. *Archives of Toxicology*, 2009, vol. 83, no. 11, pp. 965–978. <https://doi.org/10.1007/s00204-009-0455-6>
6. Radi E., Formichi P., Battisti C., Federico A. Apoptosis and oxidative stress in neurodegenerative diseases. *Journal of Alzheimers Disease*, 2014, vol. 42, no. 3, pp. S125–S152. <https://doi.org/10.3233/jad-132738>
7. Rao Y. L., Ganaraja B., Murlimanju B. V., Joy T., Krishnamurthy A., Agrawal A. Hippocampus and its involvement in Alzheimer's disease: a review. *Biotech*, 2022, vol. 12, no. 2, art. 55. <https://doi.org/10.1007/s13205-022-03123-4>
8. Reddy P. H., Tonk S., Kumar S., Vijayan M., Kandimalla R., Kuruva C. S., Reddy A. P. A critical evaluation of neuroprotective and neurodegenerative MicroRNAs in Alzheimer's disease. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2017, vol. 483, no. 4, pp. 1156–1165. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2016.08.067>
9. Johnson W. M., Wilson-Delfosse A. L., Mieyal J. J. Dysregulation of glutathione homeostasis in neurodegenerative diseases. *Nutrients*, 2012, vol. 4, no. 10, pp. 1399–1440. <https://doi.org/10.3390/nu4101399>
10. Ďurfinová M., Brechtlová M., Liška B., Barošková Ž. Comparison of spectrophotometric and HPLC methods for determination of lipid peroxidation products in rat brain tissues. *Chemical Papers*, 2007, vol. 61, no. 4, pp. 321–325. <https://doi.org/10.2478/s11696-007-0040-5>
11. Erel O. A novel automated direct measurement method for total antioxidant capacity using a new generation, more stable ABTS radical cation. *Clinical Biochemistry*, 2004, vol. 37, no. 4, pp. 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2003.11.015>
12. Rahman I., Kode A., Biswas S. K. Assay for quantitative determination of glutathione and glutathione disulfide levels using enzymatic recycling method. *Nature Protocols*, 2006, vol. 1, pp. 3159–3165. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.378>

13. Tsuchiya Y., Pham U., Gout I. Methods for measuring CoA and CoA derivatives in biological samples. *Biochemical Society Transactions*, 2014, vol. 42, no. 4, pp. 1107–1111. <https://doi.org/10.1042/bst20140123>
14. Flohé L., Günzler W. A. Assays of glutathione peroxidase. *Methods in Enzymology*, 1984, vol. 105, pp. 114–120. [https://doi.org/10.1016/s0076-6879\(84\)05015-1](https://doi.org/10.1016/s0076-6879(84)05015-1)
15. Habig W. H., Pabst M. J., Jakoby W. B. Glutathione S-transferases. The first enzymatic step in mercapturic acid formation. *Journal of Biological Chemistry*, 1974, vol. 249, no. 22, pp. 7130–7139. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(19\)42083-8](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(19)42083-8)
16. Smith I. K., Vierheller T. L., Thorne C. A. Assay of glutathione reductase in crude tissue homogenates using 5,5'-dithiobis(2-nitrobenzoic acid). *Analytical Biochemistry*, 1988, vol. 175, no. 2, pp. 408–413. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(88\)90564-7](https://doi.org/10.1016/0003-2697(88)90564-7)
17. Menon D., Board P. G. A fluorometric method to quantify protein glutathionylation using glutathione derivatization with 2,3-naphthalenedicarboxaldehyde. *Analytical Biochemistry*, 2013, vol. 433, no. 2, pp. 132–136. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2012.10.009>
18. Patsoukis N., Georgiou C. D. Determination of the thiol redox state of organisms: new oxidative stress indicators. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2004, vol. 378, pp. 1783–1792. <https://doi.org/10.1007/s00216-004-2525-1>
19. Ninfali P., Aluigi G., Pompella A. Methods for studying the glucose-6-phosphate dehydrogenase activity in brain areas. *Brain Research Protocols*, 1997, vol. 1, no. 4, pp. 357–363. [https://doi.org/10.1016/s1385-299x\(97\)00011-1](https://doi.org/10.1016/s1385-299x(97)00011-1)

Информация об авторах

Канунникова Нина Павловна – д-р биол. наук, гл. науч. сотрудник, профессор. Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (пл. Тызенгауза, 7, 230022, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: n.kanunnikova@grsu.by.

Семенович Дмитрий Сергеевич – канд. биол. наук, науч. сотрудник. НИИ физико-химической биологии им. А. Н. Белозерского МГУ (ул. Ленинские горы, 1/40, 119992, Москва, Российская Федерация). E-mail: dima-chem1@rambler.ru.

Катковская Инна Николаевна – науч. сотрудник. Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (пл. Тызенгауза, 7, 230022, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: inna_katkovskaya@mail.ru.

Титко Оксана Викторовна – науч. сотрудник. Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (пл. Тызенгауза, 7, 230022, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: o.titko@mail.ru.

Лукиенко Елена Петровна – заведующий лабораторией. Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (пл. Тызенгауза, 7, 230022, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: lukgrodno@mail.ru.

Гуринович Валерий Александрович – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (пл. Тызенгауза, 7, 230022, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: gva77@list.ru.

Моисеенок Андрей Георгиевич – член-корреспондент, д-р биол. наук, профессор, заведующий отделом. Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (пл. Тызенгауза, 7, 230022, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: andrey.moiseenok@tut.by.

Information about the authors

Kanunnikova Nina P. – D. Sc. (Biology), Chief Researcher, Professor. Institute of Biochemistry for Biologically Active Substances of the National Academy of Sciences (7, Tyzen-gauz Sq., 230022, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: n.kanunnikova@grsu.by.

Semenovich Dmitry S. – Ph. D. (Biology), Researcher. Research Institute of Physical and Chemical Biology named after A. N. Belozersky of the Moscow State University (1/40, Leninskie Gory Str., 119992, Moscow, Russian Federation). E-mail: dima-chem1@rambler.ru.

Katkovskaya Inna N. – Researcher. Institute of Biochemistry for Biologically Active Substances of the National Academy of Sciences (7, Tyzen-gauz Sq., 230022, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: inna_katkovskaya@mail.ru.

Titko Oksana V. – Researcher. Institute of Biochemistry for Biologically Active Substances of the National Academy of Sciences (7, Tyzen-gauz Sq., 230022, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: o.titko@mail.ru.

Lukiyenko Elena P. – Head of the Laboratory. Institute of Biochemistry for Biologically Active Substances of the National Academy of Sciences (7, Tyzen-gauz Sq., 230022, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: lukgrodno@mail.ru.

Gurinovich Valery A. – Ph. D. (Biology), Leading Researcher. Institute of Biochemistry for Biologically Active Substances of the National Academy of Sciences (7, Tyzen-gauz Sq., 230022, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: gva77@list.ru.

Moiseenok Andrey G. – Corresponding Member, D. Sc. (Biology), Professor, Head of the Department. Institute of Biochemistry for Biologically Active Substances of the National Academy of Sciences (7, Tyzen-gauz Sq., 230022, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: andrey.moiseenok@tut.by.

МЕДИЦИНА**MEDICINE**

УДК [615-454.1:611.018.52]:616-089.844
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-490-498>

Поступило в редакцию 13.09.2023
Received 13.09.2023

**В. Ю. Галицкая¹, М. П. Потапнев¹, В. И. Асаевич¹, В. Г. Богдан²,
С. М. Космачева¹, Ф. Н. Карпенко¹**

¹Республиканский научно-практический центр трансфузиологии и медицинских биотехнологий,
Минск, Республика Беларусь

²Отделение медицинских наук Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**ТРОМБОЦИТАРНЫЙ ГЕЛЬ И ФАКТОРЫ,
ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЕГО БИОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

(Представлено академиком В. А. Кульчицким)

Аннотация. Тромбоцитарный гель (ТГ) на основе концентрата тромбоцитов (КТ) рассматривается как перспективное терапевтическое средство с гемостатическими и регенеративными свойствами. ТГ получали из КТ, выделенных из периферической крови методом автоматического афереза, путем добавления тромбина (30 ЕД/мл). Сравнивали пролиферацию мезенхимальных стромальных клеток (МСК) человека *in vitro* в присутствии ТГ и плотность геля в зависимости от избытка фибриногена, присутствия кальция хлорида, кальция глюконата, апротинина. ТГ, образующийся из КТ в присутствии тромбина в течение 5–10 мин, представлял собой гелеобразную фибриновую пленку, содержащую тромбоциты и примесь лейкоцитов, которая способна усиливать пролиферацию МСК *in vitro*. Добавление глюконата кальция (10 мг/мл) в КТ перед тромбином вызывало образование геля, повышающего уровень пролиферации МСК *in vitro*. Внесение апротинина в ТГ в концентрации 10–1000 КИЕ/мл вызывало дозозависимое снижение скорости биодеградации геля на 5-е сутки и не влияло на способность ТГ стимулировать пролиферацию МСК человека *in vitro*.

Ключевые слова: тромбоцитарный гель, биодеградация геля, пролиферация мезенхимальных стромальных клеток *in vitro*

Для цитирования. Тромбоцитарный гель и факторы, определяющие его биологические характеристики / В. Ю. Галицкая [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 6. – С. 490–498. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-490-498>

**Viktoriya Yu. Galitskaya¹, Michael P. Potapnev¹, Vadim I. Asaevich¹, Vasilii G. Bogdan²,
Svetlana M. Kosmacheva¹, Fedor N. Karpenko¹**

¹Republican Scientific and Practical Center for Transfusiology and Medical Biotechnologies, Minsk, Republic of Belarus

²Department of the Medical Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

PLATELET GEL AND FACTORS DETERMINING ITS BIOLOGICAL ACTIVITY

(Communicated by Academician Vladimir A. Kulchitsky)

Abstract. A platelet gel (PG) derived from platelet concentrate (PC) is considered as a perspective therapeutic agent with hemostatic and regenerative properties. PG was obtained from PC separated from human peripheral blood by automatic apheresis by adding human thrombin (30 U/ml). We compared the proliferation of human mesenchymal stromal cells (MSCs) *in vitro* in the presence of PG and the dependence of gel density on excess of fibrinogen, the presence of calcium chloride, calcium gluconate, and aprotinin. PG was formed from CT in the presence of thrombin during 5–10 minutes. PG as gel-like fibrin membrane contained platelets and an admixture of leukocytes, and was capable to enhance the proliferation of MSCs *in vitro*. The presence of calcium gluconate (10 mg/ml) increased in the presence of PG the rate of MSCs proliferation *in vitro*. The presence of aprotinin in PG at a concentration of 10–1000 KIU/ml caused a dose-dependent decrease in the rate of gel biodegradation and did not affect the ability of PG to stimulate the proliferation of human MSCs *in vitro*.

Keywords: platelet gel, gel biodegradation, proliferation of mesenchymal stromal cells *in vitro*

For citation. Galitskaya V. Yu., Potapnev M. P., Asaevich V. I., Bogdan V. G., Kosmacheva S. M., Karpenko F. N. Platelet gel and factors determining its biological activity. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 6, pp. 490–498 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-490-498>

Введение. Тромбоцитарный гель (ТГ) относится к препаратам растворимых факторов тромбоцитов (РФТ), используемых в стоматологии, комбустиологии, гнойной хирургии, травматологии, трансплантологии, дерматологии. Обладая гемостатическими свойствами, ТГ, благодаря наличию РФТ, способен стимулировать заживление поврежденных слизистых и кожи, вызывать регенерацию тканей, имеет антибактериальное действие при местном применении [1]. Приготовление ТГ из периферической крови не является стандартизированной процедурой с различиями по режимам центрифугирования, концентрации тромбоцитов, примеси лейкоцитов (нейтрофилов), плотности геля [2–4]. При этом вместо аутологичной крови пациента нередко используют для получения препаратов РФТ гомологичную (аллогенную) кровь здоровых лиц, что определяется ограничениями, связанными с заболеваниями пациентов, возрастом, а также часто меньшей биологической активностью аутологичных препаратов РФТ [1; 2; 5; 6].

Цель работы состояла в разработке технологии получения ТГ из крови здоровых лиц и оценке влияния факторов, определяющих образование геля, на ростостимулирующую активность в отношении мезенхимальных стромальных клеток человека *in vitro*.

Материалы и методы исследования. Для приготовления ТГ использовали концентрат тромбоцитов (КТ), полученный от здоровых доноров крови в РНПЦ трансфузиологии и медицинских биотехнологий (РНПЦ ТиМБ) методом автоматического афереза. Все доноры тромбоцитов были обследованы на инфекционные агенты иммуноферментным методом (возбудители гепатита В, гепатита С, сифилиса, вирус иммунодефицита человека) и методом полимеразной цепной реакции (возбудители гепатита В, гепатита С, вируса иммунодефицита человека) и не имели противопоказаний к сдаче крови и ее компонентов.

На первом этапе КТ центрифугировали и доводили концентрацию тромбоцитов до $2,0 \cdot 10^9$ /мл [7]. Контроль концентрации тромбоцитов и лейкоцитов проводили с использованием гемоцитометра Sysmex (Япония). Примесь лейкоцитов составляла около $0,4 \cdot 10^6$ /мл, эритроцитов – около $0,05 \cdot 10^9$ /мл. Полученную взвесь тромбоцитов тщательно ресуспендировали в течение 3–5 мин для получения гомогенной взвеси и переносили в объеме 18 мл в стерильные чашки Петри диаметром 90 мм (Литопласт, Беларусь). В каждую чашку Петри в стерильных условиях добавляли тромбин (производства РНПЦ ТиМБ), растворенный в 3 мл 0,9 %-ного раствора натрия хлорида. Конечная концентрация тромбина составила 30 Ед/мл ТГ. Образовавшийся в течение 5–10 мин при комнатной температуре (20–22 °С) гель в чашке Петри переносили в индивидуальную упаковку – пакет плоский стерильный «СтериТ» и хранили при –30 °С. Микробиологический контроль на грамположительную и грамотрицательную флору проводили с использованием анализатора микробиологического ВАСТ/ALERT (Франция). После хранения в течение 3 месяцев после повторной сдачи донором крови или ее компонентов ТГ использовали для экспериментальных исследований.

В ряде экспериментов для приготовления ТГ вносили дополнительно хлорид кальция (в конечной концентрации 8,5 мг/мл), глюконат кальция (в конечной концентрации 10 мг/мл), фибриноген (производства РНПЦ ТиМБ, в конечной концентрации 85 мг/мл). Указанные реагенты вносили в чашки Петри перед добавлением тромбина. Апротинин («Гордокс», ОАО «Гедеон Рихтер», Венгрия) в конечной концентрации 10–1000 КИЕ/мл вносили в чашки Петри с ТГ после тромбина.

Клеточные модели *in vitro* являются стандартными для оценки биологической (регенеративной) функции ТГ [5]. Биологическую активность ТГ оценивали после его хранения при –30 °С по пролиферации МСК человека *in vitro* [8]. Материалом для исследования служили МСК костного мозга, полученные из архива лаборатории биологии и генетики стволовых клеток РНПЦ ТиМБ. Проведение теста осуществляли по ранее описанной методике [6].

Для оценки влияния на пролиферацию МСК после размораживания отбирали фрагмент ТГ размером $10 \times 10 \times 2$ мм и вносили в лунки 6-луночного планшета (Corning, США), содержащие

3 мл питательной среды α -MEM (Lonza, Швейцария), 5 % АВ (IV) сыворотки человека, 100 ед/мл пенициллина, 100 мкг/мл стрептомицина. МСК вносили в посевной концентрации $5,0 \cdot 10^3/\text{см}^2$ в полной питательной среде.

Также проводили сравнительную оценку функциональной активности супернатанта ТГ, плазмы, обогащенной растворимыми факторами тромбоцитов (ПОРФТ), аллогенной (РНПЦ ТиМБ). Для этого в лунки с МСК добавляли по 0,15 мл исследуемого растворимого препарата в конечной концентрации 5 %.

МСК культивировали в планшете в условиях CO_2 -инкубатора (37 °С, 95 % влажность, 5 % CO_2) в течение 72 ч. Затем ТГ удаляли вместе с питательной средой, прикрепившиеся ко дну лунок МСК однократно отмывали фосфатно-солевым буфером Дульбекко (Sigma Aldrich, США) и снимали добавлением 0,4 мл 0,25 %-ного раствора трипсин-ЭДТА. Действие трипсина инактивировали добавлением 0,8 мл фосфатно-солевого буферного раствора Дульбекко (Sigma Aldrich, США) с 1 % АВ (IV) сыворотки человека (РНПЦ ТиМБ). Клеточную суспензию центрифугировали, отбирали супернатант, осадок ресуспендировали в 3 мл питательной среды. Количество жизнеспособных клеток оценивали при окраске с 0,2 %-ным раствором трипанового синего, подсчет проводили в камере Горяева. Жизнеспособность клеток составляла не менее 98 %.

Влияние апротинина на биодеградацию ТГ *in vitro* оценивали визуально в динамике культивирования в питательной среде в условиях CO_2 -инкубатора (+37 °С, 5 % CO_2 , 95 % влажность). При этом процесс биодеградации геля оценивали по системе: « \rightarrow » – полная деградация ТГ, «+» – наличие единичных гелеобразных частиц, «++» – наличие единичных плотных частиц геля, «+++» – наличие остова ТГ и единичных плавающих частиц геля, «++++» – сохранение конфигурации и плотности исходного геля.

Полученные данные обрабатывались с использованием пакета статистических программ Statistica v10.0. Количество клеток в различных вариантах культивирования (включая присутствие ТГ или ПОРФТ) подсчитывали в дуплетах в 3 мл среды. Значения показателей представлены как среднее значение \pm ошибка средней арифметической ($M \pm SE$). За критический уровень статистической значимости принимали 95 %-ную вероятность ($p < 0,05$).

Результаты и их обсуждение. Разработанная технология приготовления ТГ из дозы КТ (200 мл), полученной методом автоматического афереза, позволяла получить в одной серии 8 фасовок ТГ в чашках Петри диаметром 90 мм. После внесения тромбина в течение 5 мин образовывалась однородная и цельная тромбофибриновая пленка.

После хранения ТГ в замороженном виде при -30 °С и последующей разморозки происходила ретракция ТГ до образования пленки диаметром около 50 мм и толщиной 2 мм. На рис. 1 показан внешний вид фасовки ТГ. Без дополнительной обработки ТГ был нестабилен при +37 °С, начиная с 48 ч культивирования. Для повышения прочности ТГ были апробированы методы приготовления ТГ с добавлением рабочего раствора хлорида кальция (в конечной концентрации

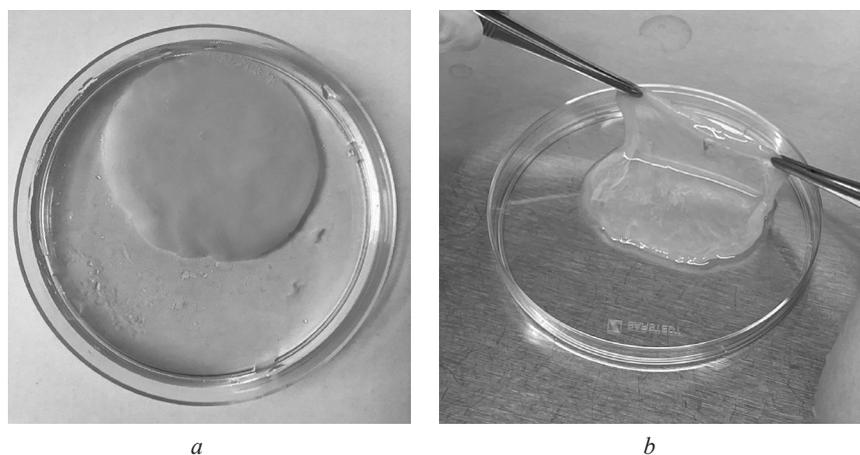


Рис. 1. Стандартная фасовка тромбоцитарного геля в чашке Петри: *a* – вид сверху; *b* – вид при использовании

Fig. 1. Standard package of platelet gel in a Petri dish: *a* – view from above; *b* – appearance when is use

8,5 мг/мл), что использовано многими авторами [3]. При этом тромбофибриновый сгусток образовался в течение 5–10 мин, его структура была однородная и более плотная, но после разморозки уменьшался в размерах до пленки диаметром 3–5 см.

Дополнительное внесение раствора глюконата кальция (в конечной концентрации 10 мг/мл), обладающего слабым местнораздражающим действием на ткани [1; 5; 9], сохраняло скорость образования ТГ под действием тромбина, плотность геля и форму округлого диска диаметром не менее 5 см после разморозки. Дополнительное внесение фибриногена (в конечной концентрации 85 мг/мл) не приводило к ускорению сроков образования геля (5–10 мин) или увеличению его плотности.

Так как ТГ является препаратом РФТ [3; 7], его регенеративную активность оценивали в тесте пролиферации МСК человека. При культивировании в питательной среде, содержащей 5 % АВ сыворотки человека, добавление фрагмента ТГ или 5 % ПОРФТ вызывало увеличение уровня пролиферирующих МСК в 2,5–3 раза по сравнению с контролем МСК. Количество клеток, выросших в присутствии ТГ, было сравнимым с таковым при добавлении ПОРФТ ($p > 0,05$) (рис. 2).

Учитывая, что гелеобразование в ТГ определяется взаимодействием фибриногена, присутствующего в плазме, содержащей КТ, с вносимым экзогенным тромбином в оптимальной концентрации (30 Ед/мл), была проведена оценка влияния дополнительно вносимого фибриногена (производства РНПЦ ТиМБ) на биологическую активность полученного ТГ. В серии экспериментов ($n = 20$) показано, что ТГ, образованный при избытке фибриногена (+85 мг/мл ТГ) при внесении в культуру МСК приводил к увеличению их количества до $70,9 \pm 6,8$ тыс. клеток в лунке, в то время как ТГ, полученный без дополнительного внесения фибриногена, – до $80,9 \pm 7,1$ тыс. клеток в лунке ($p > 0,05$). Время образования ТГ с избытком фибриногена составляло 5–10 мин, плотность геля не увеличивалась по сравнению с обычной методикой приготовления ТГ. Таким образом, дополнительное внесение фибриногена в состав ТГ не приводило ни к более быстрому образованию ТГ, ни к изменению плотности структуры геля, и не влияло на пролиферативную активность МСК.

Достаточно часто для стимуляции образования ТГ применяют соли кальция, добавление которых к плазме или КТ формирует гель в течение 5–10 мин. Мы использовали раствор кальция хлорида (8,5 мг/мл) или раствор кальция глюконата (10 мг/мл), вносимый в объеме 3 мл на 18 мл

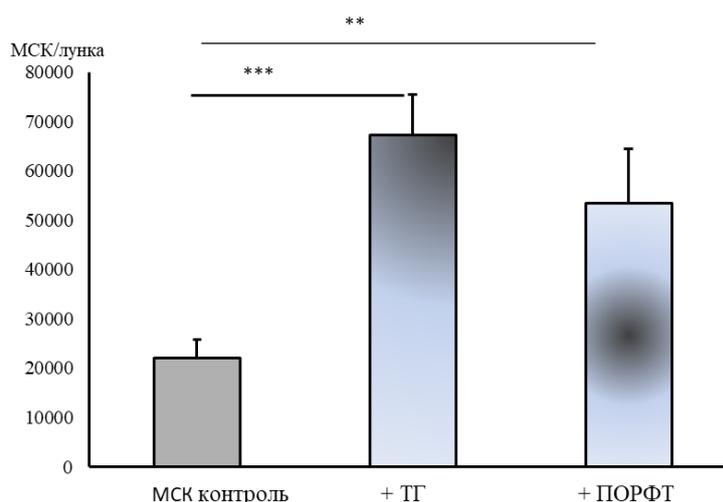


Рис. 2. Пролиферация МСК человека *in vitro* ($n = 20$) в присутствии фрагмента тромбоцитарного геля (ТГ) ($10 \times 10 \times 2$ мм) или 5 % плазмы, обогащенной растворимыми факторами тромбоцитов (ПОРФТ), при культивировании в течение 72 ч.

Примечание: данные представлены как $M \pm SE$; ** – $p = 0,0097$; *** – $p < 0,0001$

Fig. 2. Proliferation of human MSCs *in vitro* ($n = 20$), in the presence of a fragment of platelet gel (PG) ($10 \times 10 \times 2$ mm) or 5 % platelet rich plasma (PRP), cultured for 72 hours.

Notes: data are presented as $M \pm SE$; ** – $p = 0,0097$; *** – $p < 0,0001$

концентрата тромбоцитов в чашке Петри. Образующийся при этом ТГ обладал хорошей ригидностью, плотной структурой. Фрагменты ТГ, полученные в присутствии кальция хлорида, при внесении в культуру клеток вызывали в течение 3 суток увеличение количества МСК до $82\,950 \pm 5\,785,6$ клеток на лунку ($n = 20$), что не отличалось ($p = 0,56$) от влияния ТГ, полученного стандартно с использованием тромбина ($77\,200 \pm 7\,973,8$ клеток на лунку, $n = 20$), в контроле без внесения ТГ – $34\,487,5 \pm 3\,161,11$ клеток на лунку ($n = 20$). Добавление глюконата кальция приводило к формированию ТГ, который вызывал *in vitro* увеличение количества МСК в течение 3 суток до $97\,260,42 \pm 5\,668,86$ клеток на лунку ($n = 24$), что несколько выше ($p = 0,047$) по сравнению с действием стандартно полученного ТГ без глюконата кальция ($79\,322,9 \pm 6\,722,36$ клеток на лунку, $n = 24$), в контроле МСК без ТГ – $32\,375 \pm 3\,565,29$ клеток на лунку ($n = 24$).

Супернатант, образующийся при ретракции ТГ после разморозки, также обладал рост-стимулирующим действием в отношении МСК. Добавление 5 % супернатанта в культуру клеток вызывало усиление пролиферативной активности МСК в течение 3 суток культивирования до $98\,500 \pm 6340$ клеток на лунку ($n = 24$), что достоверно отличалось по сравнению с контролем МСК ($28\,300 \pm 3\,800$ клеток на лунку ($n = 16$)) ($p = 0,005$). При этом в присутствии ТГ, полученного стандартно с использованием тромбина, количество клеток достигло $72\,900 \pm 4\,400$ на лунку ($n = 16$). Эти результаты подтверждают, что ТГ активно выделяет растворимые ростовые факторы в окружающую среду, которые усиливают пролиферацию МСК.

Полученные данные свидетельствуют о том, что ТГ оказывает стимулирующее действие и поддерживает пролиферацию МСК человека. Добавление глюконата кальция при приготовлении ТГ является эффективным способом сохранения формы геля и его биологической активности в отношении пролиферации МСК *in vitro*.

Установлено, что при культивировании ТГ при $+37\text{ }^\circ\text{C}$ происходила визуально определяемая биодеградация геля. Для замедления биодеградации геля, что важно для клинического применения ТГ, нами была проведена оценка влияния апротинина на плотность геля и сохранение им биологической активности в условиях культивирования с МСК. Результаты оценки плотности геля при длительном культивировании ТГ при $+37\text{ }^\circ\text{C}$ представлены в таблице.

Снижение биодеградации тромбоцитарного геля, культивированного *in vitro*, под влиянием апротинина

Decreased biodegradation of platelet gel cultured *in vitro* under the influence of aprotinin

Срок наблюдения (дни) Days of observation	Прочность геля при добавлении апротинина (КИЕ/мл) Gel density dependence on aprotinin (KIU/ml)			
	0	10	50	1000
1	++++	++++	++++	++++
3	++++	++++	++++	++++
5	+++	++++	++++	++++
7	++	+++	+++	++++
10	+	+++	+++	++++

Примечание: представлены суммарные результаты 3 повторных экспериментов.

Note: the total results of 3 repeated experiments are presented.

Как видно из таблицы, апротинин в концентрации 10–50 КИЕ/мл значительно снижал скорость биодеградации ТГ, что особенно заметно в условиях культивирования геля при $+37\text{ }^\circ\text{C}$ более 5 дней. Апротинин в концентрации 1000 КИЕ/мл значительно повысил устойчивость ТГ к биодеградации в течение всего срока наблюдения (10 дней) без негативного влияния на биологическую активность. Добавление ТГ, полученного в присутствии апротинина, полностью сохраняло его ростстимулирующую активность в отношении МСК при всех использованных концентрациях (рис. 3).

Таким образом, добавление апротинина в использованных концентрациях повышало прочность ТГ и его устойчивость к биодеградации при культивировании *in vitro*. В то же время известно, что в дозах, применяемых для подавления фибринолиза, апротинин угнетает также реак-

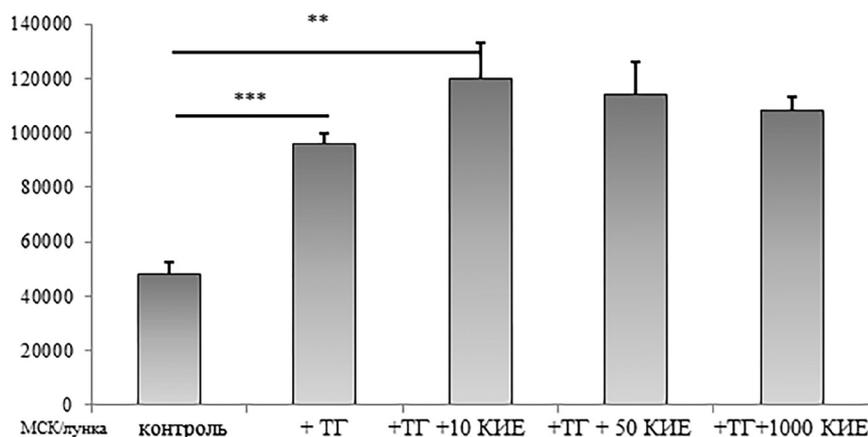


Рис. 3. Пролiferация мезенхимальных стромальных клеток (МСК) человека *in vitro* в присутствии тромбоцитарного геля (ТГ), стабилизированного добавлением апротинина (10, 50, 1000 КИЕ/мл) в течение 72 ч. Примечание: *** – $p < 0,0001$; ** – $p = 0,007$

Fig. 3. Proliferation of human mesenchymal stromal cells (MSCs) in the presence of platelet gel (PG) stabilized by the addition of aprotinin (10, 50, 1000 KIU/ml) during 72 hours of cultivation *in vitro*. Note: *** – $p < 0,0001$; ** – $p = 0,007$

цию воспаления (ингибируя ряд провоспалительных цитокинов, например ИЛ-6, ИЛ-10, ФНО- α) и процессы репарации поврежденных тканей [10].

ТГ рассматривается как второе поколение препаратов концентратов тромбоцитов с регенеративными свойствами (препаратами ПОРФТ/PRP) [4; 11; 12]. Преимуществами ТГ по сравнению с растворимыми препаратами ПОРФТ/PRP считают: а) гемостатические свойства, б) наличие фибринового матрикса для стимуляции гистогенеза, в) более длительный срок (7–14 дней) выделения растворимых факторов из геля, г) возможность более редкого (1 раз в 3–7 дней) проведения одной процедуры нанесения на раневую поверхность [1–4; 11]. В то же время при получении ТГ в клинических условиях снижено (мало контролируемо) количество тромбоцитов и повышено содержание лейкоцитов в мл объема, что может ослаблять его противовоспалительный и регенеративный потенциал [12]. Большинство авторов использовали аутологичный продукт из крови пациентов, который может отличаться по методу получения и биологической активности ТГ [1; 5; 11; 13]. При тяжелых заболеваниях пациентов (рак, диабет, аутоиммунные или онкогематологические заболевания, тромбоцитопения и др.) и для пожилых пациентов рекомендуется использовать аллогенный ТГ [2; 3]. Получение аллогенного ТГ возможно из пулированных образцов лейкоцитарного слоя периферической крови здоровых лиц [9], либо из КТ, полученного методом автоматического тромбоцитафереза [1; 5]. Последний является более привлекательным в связи с возможностью стандартизовать технологию получения ТГ и содержание тромбоцитов и лейкоцитов в конечном биопродукте. Использование для получения ТГ взвеси тромбоцитов, полученных аферезным методом, снижает количество лейкоцитов, повышает содержание активированных CD62⁺ тромбоцитов и микрочастиц, снижает примесь эритроцитов [14; 15].

Поэтому нами для приготовления ТГ использован КТ, полученный методом автоматического афереза. Гель, образовавшийся после добавления тромбина, являлся пленкоподобным, с фибриновыми нитями в структуре, а по своим биологическим (регенеративным) свойствам был сравним с ПОРФТ. Секретируемые ТГ растворимые факторы обладали не меньшей активностью по сравнению с ПОРФТ, что подтверждает его высокие регенеративные способности за счет паракринных механизмов [5; 9]. Повышение прочности ТГ и снижения его биodeградируемости не изменялись при создании избытка фибриногена в образующемся геле. Полученный ТГ с избытком фибриногена визуально не отличался от исходного по прочности и в тесте пролиферации МСК. Дополнительное внесение кальция хлорида также не повлияло существенно на плотность геля и его способность стимулировать пролиферацию МСК *in vitro*. Глюконат кальция часто

используется для получения ТГ [1; 2; 5]. Нами показано, что дополнительное внесение глюконата кальция не влияло на прочность геля ТГ и оказывало слабый положительный эффект (+22 %, $p = 0,047$) на пролиферацию МСК в присутствии ТГ *in vitro*.

Апротинин достаточно широко используется для стабилизации биodeградируемых гемостатических средств в медицине, поэтому мы оценили его влияние на формирование ТГ. Наши исследования показали, что апротинин в концентрации 10 КИЕ/мл оказывал существенное стабилизирующее значение на биodeградацию геля при более чем 5 суток культивирования *in vitro* при +37 °С при сохранении биологической активности ТГ по поддержанию пролиферации МСК. Повышение концентрации апротинина до 50 КИЕ/мл существенно не изменяло, а 1000 КИЕ/мл – усиливало устойчивость ТГ к биodeградации в течение 7 и 10 дней наблюдения. При этом биологическая активность ТГ (пролиферация МСК в присутствии ТГ) не изменялась.

Заключение. Технология производства ТГ из концентрата аферезных тромбоцитов периферической крови человека позволяет получить биodeградируемый гель, обладающий регенеративными свойствами при оценке способности поддерживать пролиферацию МСК человека *in vitro*. Показаны преимущества использования глюконата кальция на биологическую активность ТГ и добавления апротинина для повышения плотности и устойчивости к биodeградации ТГ *in vitro* без потери биологической активности в отношении МСК человека. ТГ имеет сравнимые с ПОРФТ биологическими свойствами *in vitro* и обладает преимуществами формирования депо РФТ при местном клиническом применении.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства здравоохранения Республики Беларусь (грант № 20221498).

Acknowledgement. The Ministry of Health of the Republic of Belarus (grant no. 20221498) supported the work.

Список использованных источников

1. Platelet gel for healing cutaneous chronic wounds / G. Crovetti [et al.] // *Transfus. Apher. Sci.* – 2004. – Vol. 30, N 2. – P. 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.transci.2004.01.004>
2. Platelet gel: a new therapeutic tool with great potential / A. Piccin [et al.] // *Blood Transfus.* – 2017. – Vol. 15, N 4. – P. 333–340. <https://doi.org/10.2450/2016.0038-16>
3. Platelet-derived bio-products: classification update, applications, concerns and new perspectives / A. Acebes-Huerta [et al.] // *Transfus. Apheresis Sci.* – 2020. – Vol. 59, N 1. – Art. 102716. <https://doi.org/10.1016/j.transci.2019.102716>
4. Choukroun, J. Platelet-rich fibrin “PRF” and regenerative medicine: ‘The low-speed concept’ / J. Choukroun, A. A. Aalam, R. J. Miron // *MSCs and Innovative Biomaterials in Dentistry.* – 2017. – Vol. 1, N 2. – P. 21–41. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55645-1_2
5. Evaluation of the effects of homologous platelet gel on healing lower extremity wounds in patients with diabetes / G.-Q. Shan [et al.] // *Int. J. Low Extrem. Wounds.* – 2013. – Vol. 12, N 1. – P. 22–29. <https://doi.org/10.1177/1534734613477113>
6. Экспериментальное и клиническое обоснование применения плазмы, обогащенной растворимыми факторами тромбоцитов, для лечения длительно незаживающих ран при сахарном диабете / А. А. Троянов [и др.] // *Медицинский журнал.* – 2018. – № 2. – С. 112–117.
7. Плазма крови, обогащенная растворимыми факторами тромбоцитов: получение, стандартизация, медицинское применение / М. П. Потапнев [и др.] // *Здравоохранение.* – 2018. – № 10. – С. 38–44.
8. International Forum on GMP-grade human platelet lysate for cell propagation: summary / D. Strunk [et al.] // *Vox Sang.* – 2018. – Vol. 113, N 1. – P. 80–87. <https://doi.org/10.1111/vox.12593>
9. Treatment of recalcitrant ulcers with allogeneic platelet gel from pooled platelets in aged hypomobile patients / N. Greppi [et al.] // *Biologicals.* – 2011. – Vol. 39, N 2. – P. 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.biologicals.2011.01.002>
10. Effects of Aprotinin or Tranexamic Acid on Proteolytic/Cytokine Profiles in Infants After Cardiac Surgery / T.-Y. Hsia [et al.] // *Ann. Thorac. Surg.* – 2010. – Vol. 89, N 6. – P. 1843–1852. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2010.02.069>
11. Progressive Platelet Rich Fibrin tissue regeneration matrix: Description of a novel, low cost and effective method for the treatment of chronic diabetic ulcers-Pilot study / C. J. Saboia-Dantas [et al.] // *PLoS One.* – 2023. – Vol. 18, N 5. – P. 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284701>
12. Platelet-rich fibrin and soft tissue wound healing: a systematic review / R. J. Miron [et al.] // *Tissue Eng. Part B Rev.* – 2017. – Vol. 23, N 1. – P. 83–99. <https://doi.org/10.1089/ten.teb.2016.0233>
13. Богдан, В. Г. Проспективное рандомизированное клиническое исследование эффективности применения аутологичных тромбоцитарных концентратов для стимуляции регенерации трофических язв венозной этиологии / В. Г. Богдан, Д. А. Толстов // *Новости хирургии.* – 2014. – Т. 22, № 3. – С. 344–350.

14. Difference in levels of platelet-derived microparticles in platelet components prepared using the platelet rich plasma, buffy coat, and apheresis procedures / E. Noulisri [et al.] // *Transfusion and Apheresis Science*. – 2017. – Vol. 56, N 2. – P. 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.transci.2016.10.006>
15. Oneto, P. PRP in wound healing applications / P. Oneto, J. Etuiain // *Platelets*. – 2021. – Vol. 32, N 2. – P. 189–199. <https://doi.org/10.1080/09537104.2020.1849605>

References

1. Crovetto G., Martinelli G., Issi M., Barone M., Guizzardi M., Campanati B., Moroni M., Carabelli A. Platelet gel for healing cutaneous chronic wounds. *Transfus and Apheresis Sciences*, 2004, vol. 30, no. 2, pp. 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.transci.2004.01.004>
2. Piccin A., Di Piero A., Canzian L., Primerano M., Corvetta D., Negri G., Mazzoleni G., Gastl G., Steurer M., Gentilini I., Eisendle K., Fontanella F. Platelet gel: a new therapeutic tool with great potential. *Blood Transfus*, 2017, vol. 15, no. 4, pp. 333–340. <https://doi.org/10.2450/2016.0038-16>
3. Acebes-Huerta A., Arias-Fernandez T., Bernardo A., Muñoz-Turrillas M. C., Fernández-Fuertes J., Seghatchian J., Gutiérrez L. Platelet-derived bio-products: classification update, applications, concerns and new perspectives. *Transfusion and Apheresis Science*, 2020, vol. 59, no. 1, art. 102716. <https://doi.org/10.1016/j.transci.2019.102716>
4. Choukroun J., Aalam A. A., Miron R. J. Platelet rich fibrin “PRF” and regenerative medicine: ‘The low-speed concept’. *MSCs and Innovative Biomaterials in Dentistry*, 2017, vol. 1, no. 2, pp. 21–41. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55645-1_2
5. Shan G.-Q., Zhang Y.-N., Ma J., Li Y. H., Zuo D. M., Qiu J. L., Cheng B., Chen Z. L. Evaluation of the effects of homologous platelet gel on healing lower extremity wounds in patients with diabetes. *International Journal of Lower Extremity Wounds*, 2013, vol. 12, no. 1, pp. 22–29. <https://doi.org/10.1177/1534734613477113>
6. Troyanov A. A., Kondratenko G. G., Potapnev M. P., Kolesnikova T. S., Khodosovskaya E. V., Arabei A. A., Nevevov P. S. Experimental and clinical justification for the use of platelet-rich plasma to treat long-term healing wounds in diabetes. *Medicinskij zhurnal = Medical Journal*, 2018, no. 2, pp. 112–117 (in Russian).
7. Potapnev M. P., Krivenko S. I., Bogdan V. G., Kosmacheva S. M., Shlyaga O. L., Karpenko F. N. Platelet-rich derived plasma: manufacture and medical application. *Zdravoohranenie = Healthcare*, 2018, no. 10, pp. 38–44 (in Russian).
8. Strunk D., Lozano M., Marks D. C., Loh Y. S., Gstraunthaler G., Schennach H., Rohde E. [et al.]. International Forum on GMP-grade human platelet lysate for cell propagation: summary. *Vox Sanguinis*, 2018, vol. 113, no. 1, pp. 80–87. <https://doi.org/10.1111/vox.12593>
9. Greppi N., Mazzucco L., Galetti G., Bona F., Petrillo E., Smacchia C., Raspolini E., Cossovich P., Caprioli R., Borzini P., Rebullia P., Marconi M. Treatment of recalcitrant ulcers with allogeneic platelet gel from pooled platelets in aged hypomobile patients. *Biologicals*, 2011, vol. 39, no. 2, pp. 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.biologicals.2011.01.002>
10. Hsia T. Y., McQuinn T. C., Mukherjee R., Deardorff R. L., Squires J. E., Stroud R. E., Crawford F. A., Bradley S. M., Reeves S. T., Spinale F. G. Effects of Aprotinin or Tranexamic Acid on Proteolytic/Cytokine Profiles in Infants After Cardiac Surgery. *Annals of Thoracic Surgery*, 2010, vol. 89, no. 6, pp. 1843–1852. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2010.02.069>
11. Saboia-Dantas C. J., Dechichi P., Fech R. L., Carvalho Furst R. V., Raimundo R. D., Correa J. A. Progressive platelet rich fibrin tissue regeneration matrix: Description of a novel, low cost and effective method for the treatment of chronic diabetic ulcers-pilot study. *PLoS One*, 2023, vol. 18, no. 5, pp. 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284701>
12. Miron R. J., Fujioka-Kobayashi M., Bishara M., Zhang Y., Hernandez M., Choukroun J. Platelet-rich fibrin and soft tissue wound healing: a systematic review. *Tissue Engineering Part B: Reviews*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 83–99. <https://doi.org/10.1089/ten.teb.2016.0233>
13. Bogdan V. G., Tolstov D. A. Prospective randomized clinical trials of efficiency of autologous platelet-derived concentrates to stimulate regeneration of trophic ulcers of venous etiology. *Novosti Khirurgii [News of Surgery]*, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 344–350 (in Russian).
14. Noulisri E., Udomwinijilp P., Lerdwana S., Chongkolwatana V., Permpikul P. Difference in levels of platelet-derived microparticles in platelet components prepared using the platelet rich plasma, buffy coat, and apheresis procedures. *Transfusion and Apheresis Science*, 2017, vol. 56, no. 2, pp. 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.transci.2016.10.006>
15. Oneto P., Etulain J. PRP in wound healing applications. *Platelets*, 2021, vol. 32, no. 2, pp. 189–199. <https://doi.org/10.1080/09537104.2020.1849605>

Информация об авторах

Галицкая Виктория Юрьевна – мл. науч. сотрудник. РНПЦ трансфузиологии и медицинских биотехнологий (Долгиновский тракт, 160, 220080, Минск, Республика Беларусь). E-mail: galivika00@gmail.com. ORCID: 0009-0009-7670-8156

Потапнев Михаил Петрович – д-р мед. наук, профессор, заведующий отделом. РНПЦ трансфузиологии и медицинских биотехнологий (Долгиновский тракт, 160, 220080, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mpotapnev@yandex.by. ORCID: 0000-0002-6805-1782

Information about the authors

Galitskaya Viktoriya Yu. – Junior Researcher. Republican Scientific and Practical Center for Transfusiology and Medical Biotechnologies (Dolginovsky tract, 160, 220080, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: galivika00@gmail.com. ORCID: 0009-0009-7670-8156

Potapnev Michael P. – D. Sc. (Medicine), Professor, Head of the Department. Republican Scientific and Practical Center of Transfusiology and Medical Biotechnologies (Dolginovsky tract, 160, 220080, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mpotapnev@yandex.by. ORCID: 0000-0001-7705-9383

Асаевич Вадим Игоревич – мл. науч. сотрудник. РНПЦ трансфузиологии и медицинских биотехнологий (Долгиновский тракт, 160, 220080, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mantonik@mail.ru. ORCID: 0000-0002-2257-6452

Богдан Василий Генрихович – д-р мед. наук, профессор, академик-секретарь. Отделение медицинских наук НАН Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: medic@presidium.bas-net.by. ORCID: 0000-0001-7849-6497

Космачева Светлана Михайловна – канд. мед. наук, доцент, заведующий лабораторией. РНПЦ трансфузиологии и медицинских биотехнологий (Долгиновский тракт, 160, 220080, Минск, Республика Беларусь). E-mail: 4kosmacheva@mail.ru. ORCID: 0000-0002-1617-8845

Карпенко Фёдор Николаевич – канд. мед. наук, директор. РНПЦ трансфузиологии и медицинских биотехнологий (Долгиновский тракт, 160, 220080, Минск, Республика Беларусь). E-mail: director@blood.by. ORCID: 0009-0009-7890-5495

Asaevich Vadim I. – Junior Researcher. Republican Scientific and Practical Center of Transfusiology and Medical Biotechnologies (Dolginovsky tract, 160, 220080, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mantonik@mail.ru. ORCID: 0000-0002-2257-6452

Bogdan Vasily G. – D. Sc. (Medicine), Professor, Academician-Secretary. Department of Medical Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: medic@presidium.bas-net.by. ORCID: 0000-0001-7849-6497

Kosmacheva Svetlana M. – Ph. D. (Medicine), Head of the Laboratory. Republican Scientific and Practical Center of Transfusiology and Medical Biotechnologies (Dolginovsky tract, 160, 220080, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: 4kosmacheva@mail.ru. ORCID: 0000-0002-1617-8845

Karpenko Fedor N. – Ph. D. (Medicine), Director. Republican Scientific and Practical Center of Transfusiology and Medical Biotechnologies (Dolginovsky tract, 160, 220080, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: director@blood.by. ORCID: 0009-0009-7890-5495

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

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCES

УДК 551.509.3
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-499-507>

Поступило в редакцию 08.11.2023
Received 08.11.2023

С. А. Лысенко, академик В. Ф. Логинов

*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ
КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
КАК ОСНОВА ДОЛГОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ ПОГОДЫ**

Аннотация. Предложен новый метод исследования дальних (телеконнекционных) связей в климате Земли, основанный на выделении в глобальных метеорологических полях температуры и давления климатически сопряженных районов по характерному для них когерентному квазипериодическому колебанию. Данный метод реализован с целью отбора предикторов зимней температуры воздуха в Беларуси с заблаговременностью 2 месяца. В качестве критерия отбора предикторов рассматривалась степень когерентности давления на уровне моря и зимней температуры в Беларуси на квази-8-летнем цикле. Прогноз реализован с использованием передовой модели глубокого машинного обучения TimesNet и показал достаточно высокие для сезонного метеорологического прогноза метрики качества: коэффициент корреляции фактических и предсказанных значений температуры составил 0,66, а взвешенные макросредние значения точности и полноты прогноза в градации «норма», «выше нормы» и «ниже нормы» составили 0,61 и 0,56 соответственно.

Ключевые слова: долгосрочный метеорологический прогноз, квазипериодические колебания, когерентность метеорологических полей

Для цитирования. Лысенко, С. А. Пространственно-временная когерентность квазипериодических компонент метеорологических полей как основа долгосрочных прогнозов погоды / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 6. – С. 499–507. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-499-507>

Sergey A. Lysenko, Academician Vladimir F. Loginov

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

**SPATIAL AND TEMPORAL COHERENCE OF QUASI-PERIODIC COMPONENTS
OF METEOROLOGICAL FIELDS AS A BASIS FOR LONG-TERM WEATHER FORECASTS**

Abstract. A new method of teleconnections studding is proposed which is based on the identification of conjugate regions in the global meteorological fields of temperature and pressure by their characteristic coherent quasi-periodic oscillation. This method was implemented in order to select predictors of winter air temperature in Belarus with an advance of 2 months. The degree of coherence of sea level pressure and winter temperature in Belarus on a quasi-8-year cycle was considered as a criterion for the selection of predictors. The forecast was implemented using the advanced deep machine learning model TimesNet and showed rather high metrics of quality for seasonal meteorological forecasting: the correlation coefficient between actual and predicted temperature values was 0.66, and the weighted macro-average values of precision and recall of the forecast in the gradations “normal”, “above normal” and “below normal” were 0.61 and 0.56, respectively.

Keywords: long-term meteorological forecast, quasi-periodic oscillations, coherence of meteorological fields

For citation. Lysenko S. A., Loginov V. F. Spatial and temporal coherence of quasi-periodic components of meteorological fields as a basis for long-term weather forecasts. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 6, pp. 499–507 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-499-507>

Введение. В результате развития системы глобальных метеорологических наблюдений, вычислительных и информационных технологий качество численных краткосрочных (до 72 ч) и среднесрочных (до 7 дней) прогнозов погоды неуклонно повышается. На сегодняшний день численные прогнозы погоды на срок 72 ч оправдываются в 98 % случаев, а оправдываемость прогнозов на 7 суток приблизилась к 80 %, тогда как еще в 2000 г. она была на уровне 60 %. Однако при дальнейшем росте заблаговременности оправдываемость численных прогнозов погоды резко падает и для прогноза на 10 суток она составляет всего 50 %.

Долгосрочные прогнозы погоды (на месяц и сезон) в настоящее время в основном носят экспериментальный характер [1]. Гидродинамические модели атмосферы, как правило, не обеспечивают удовлетворительного качества долгосрочного метеорологического прогноза, поэтому для его составления так или иначе используются синоптико-статистические методы [2]. В последние годы данные методы все чаще применяются для коррекции детерминистских прогнозов гидродинамических моделей. При этом важно подчеркнуть, что речь в данном случае идет лишь о прогнозе среднемесячных или среднесезонных аномалий метеорологических параметров в градации ниже нормы, норма и выше нормы.

Важная роль в повышении качества долгосрочных метеорологических прогнозов отводится учету таких инерционных факторов климатической системы, как распределение температуры поверхности океана, состояние морского льда в Арктике, ледяного и снежного покрова суши. Другим источником предсказуемости метеорологических характеристик на долгие сроки является цикличность крупномасштабной циркуляции атмосферы и океана.

Попытки установления, так называемых *далеких корреляционных связей (teleconnections)* в климате Земли предпринимались неоднократно [2–5]. Однако отсутствие достаточного понимания природы и механизмов передачи сигналов в климатической системе и хаотичность самой атмосферы все еще не позволяют успешно применять эти связи в теории и практике долгосрочного и сверхдолгосрочного прогнозирования.

В настоящей работе предложен новый метод исследования дальних корреляционных связей в климате Земли, перспективный для отбора предикторов долгосрочного метеорологического прогноза. В основе метода лежит идея выделения в глобальных метеорологических полях регионов с когерентными квазипериодическими колебаниями, имеющими общую природу. Возможности метода демонстрируются на примере долгосрочного (с заблаговременностью 2 месяца) прогноза средней зимней температуры воздуха в Беларуси. В качестве предикторов прогноза температуры используются аномалии давления на уровне моря в Северной Атлантике в августе и сентябре. Прогноз реализуется с использованием передовой модели глубокого машинного обучения TimesNet, основанной на преобразовании временных рядов предикторов и прогнозируемой целевой переменной в двумерные изображения на основе периодических выборок и их анализе методами компьютерного зрения.

Анализ пространственно-временных связей метеорологических полей. Как показывают данные инструментальных метеорологических наблюдений, в изменениях температуры и давления в различных регионах Земного шара помимо суточного и годового хода присутствуют циклические колебания разной продолжительности. Наиболее известными циклами атмосферной и океанической изменчивости в Атлантико-Европейском регионе являются циклы с периодами около 8 и 60 лет. При этом периоды этих циклов не являются постоянными, а могут меняться в зависимости от региона и эпохи в диапазонах 7–10 и 50–70 лет [6–10].

Наибольшее влияние на зимнюю погоду в Беларуси оказывает *североатлантическое колебание (North Atlantic Oscillation – NAO)*, зависящее от разницы давления между двумя постоянными барическими центрами действия атмосферы в Северной Атлантике – Азорским максимумом и Исландским минимумом. Это колебание определяет интенсивность геострофического зонального переноса воздушных масс с акватории Северной Атлантики на Европейский континент в холодный период года.

В индексе NAO обнаруживаются как квази-8-летний, так и квази-60-летний циклы, причем квази-8-летний цикл NAO синхронизирован с аналогичным циклом зимней температуры воздуха в Беларуси. Данный цикл вместе с трендом объясняет около 50 % суммарной дисперсии

средней зимней температуры в Беларуси, что делает крайне привлекательной идею его использования для долгосрочного метеорологического прогноза. Сложность в реализации этой идеи состоит в том, что продолжительность этого цикла, как уже отмечалось выше, непостоянна, а амплитуда меняется в диапазоне от 1 до 2,5 °С, что делает невозможным его экстраполяцию. Однако если предположить, что квази-8-летние колебания температуры и давления во всем Атлантико-Европейском регионе имеют общую природу, то можно попытаться найти климатически сопряженные на этом цикле районы, способные выступать в качестве предикторов долгосрочного метеорологического прогноза для Беларуси.

Мерой схожести метеорологических циклов в климатически сопряженных районах может служить нормированная функция взаимной когерентности

$$\gamma_{12}(\tau) = \frac{\langle A_1(t + \tau)A_2(t) \rangle}{\left[\langle |A_1(t)|^2 \rangle \langle |A_2(t)|^2 \rangle \right]^{1/2}},$$

где A_1 и A_2 – некоторые метеорологические величины (необязательно одной физической размерности) в двух различных точках пространства \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 ; $\langle \cdot \rangle$ – усреднение по времени t ; τ – временной сдвиг колебаний A_1 и A_2 . Величина $\max_{\tau} \{\gamma_{12}(\tau)\}$ называется *степенью когерентности*: она принимает значение 0 при полной независимости колебаний в точках \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 , 1 – когда поле в точке \mathbf{r}_1 в момент времени $t + \tau$ полностью определяется полем в точке \mathbf{r}_2 в момент времени t , и промежуточные значения – при частичной когерентности колебаний.

Для выделения квази-8-летнего колебания в изменениях метеорологических величин применялся *сингулярный спектральный анализ* (Singular Spectrum Analysis – SSA). Период каждой компоненты и попарных сумм компонент сингулярного разложения временного ряда оценивался на основе анализа Фурье. В качестве искомой квазипериодической компоненты временных рядов метеовеличин выбиралась компонента, описываемая отдельным собственным вектором или парой собственных векторов с периодом в диапазоне 7–10 лет.

Поиск компонент, когерентных квази-8-летнему циклу зимней температуры воздуха в Беларуси на высоте 2 м (T_{2m}), производился в поле давления на уровне моря (Sea Level Pressure – SLP). Использовались геопространственные среднемесячные данные метеорологического центра Хэддли (архив данных HadSLP2), имеющие разрешение по долготе и широте около 5° и охватывающие период с 1850 по 2019 г. Во временном ряду SLP каждого участка земной поверхности размером 5 × 5° выполнялось выделение квази-8-летнего цикла и, при его наличии, вычислялась доля выбираемой им дисперсии и степень его когерентности аналогичному циклу T_{2m} с лагом в несколько месяцев. Регионы с наивысшей степенью когерентности циклов SLP и T_{2m} определяют выбор потенциальных лаговых предикторов долгосрочного метеорологического прогноза для территории Беларуси.

Для холодного периода года происхождение квази-8-летнего цикла в Атлантико-Европейском регионе так или иначе связано с североатлантическим колебанием (NAO), поэтому целесообразно первоначально рассмотреть проявление цикла NAO в поле зимней температуры воздуха. Соответствующие результаты представлены на рис. 1.

Как уже отмечалось выше, в изменениях NAO обнаруживается квази-8-летняя и квази-60-летняя цикличность. Первый цикл выбирает примерно 16 %, а второй – 13 % общей дисперсии NAO, что в совокупности составляет достаточно значимую величину в климате Атлантико-Европейского региона. Этот климатический сигнал отчетливо проявляется в поле приземной температуры, особенно в очагах глубокой зимней конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, Лабрадор и Ирмингера [11]. Этот факт хорошо согласуется с результатами ранее опубликованной работы [12], в которой показано, что изменения температуры океана в высоких широтах Северной Атлантики и Северных морей на 8-летнем цикле могут рассматриваться в качестве одного из основных предикторов долгосрочного прогноза погоды Европы и ледовитости Арктики в зимний период.

Физическое объяснение квази-8-летнего цикла в море Лабрадор дано в [10], где на основании численного моделирования геострофического транспорта вод в нижнем звене меридиональ-

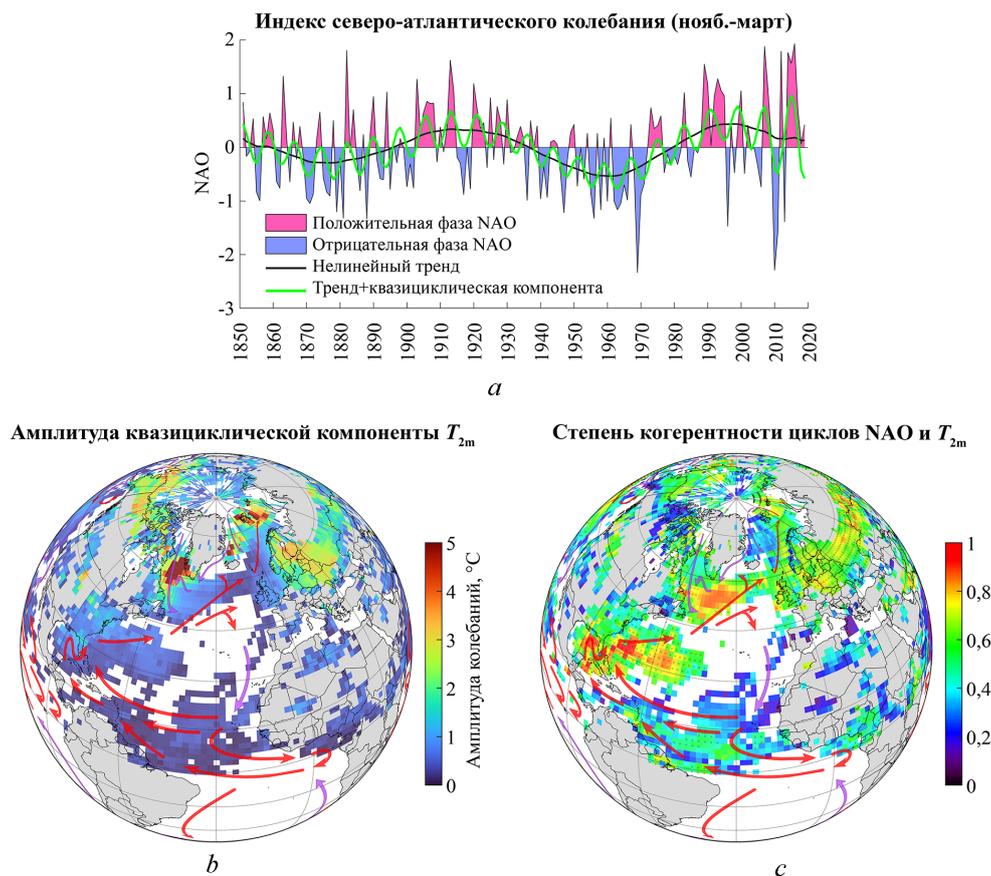


Рис. 1. Взаимосвязь индекса NAO и зимней температуры воздуха (T_{2m}) на квазипериодическом цикле 7–10 лет: a – временной ряд индекса NAO и его квазициклические компоненты; b – максимальная амплитуда колебаний T_{2m} на квази-8-летнем цикле; c – степень когерентности квази-8-летних колебаний T_{2m} и NAO (точками отмечены районы со статистически значимой когерентностью на уровне $\alpha = 0,01$)

Fig. 1. Relation between NAO index and winter air temperature (T_{2m}) on a quasi-periodic cycle of 7–10 years: a – time series of NAO index and its quasi-cyclic components; b – maximum amplitude of T_{2m} fluctuations on a quasi-8-year cycle; c – degree of coherence of quasi-8-year fluctuations of T_{2m} and NAO (dots indicate areas with statistically significant coherence at the level $\alpha = 0.01$)

ной термохалинной циркуляции вод Северной Атлантики показано, что среднее время переноса плотностных аномалий глубинных вод моря Лабрадор к субтропическим широтам ($26,5^\circ$ с. ш.) составляет 7–8 лет. Положительная и отрицательная фазы NAO формируют противоположные по знаку аномалии солёности вод в море Лабрадор, которые, в свою очередь, оказывают воздействие на транспорт холодных вод западными пограничными течениями, что создает основу автоколебательного процесса в климате Атлантико-Европейского региона.

На континентах квази-8-летний цикл зимней температуры имеет наибольшую амплитуду в районе Северной и Восточной Европы, включая и территорию Беларуси. Этот цикл статистически достоверно ($p \leq 0,01$) связан с аналогичным циклом NAO, о чем свидетельствует достаточно высокая степень их когерентности при нулевом лаге.

Еще более высокая степень когерентности NAO и T_{2m} (близкая к единице) наблюдается в области течения Гольфстрим и субполярного циклонического круговорота, в котором согласно схеме океанической циркуляции происходит взаимодействие Лабрадорского и Северо-Атлантического течений. Данный регион считается наиболее энергоактивной зоной Северной Атлантики и характеризуется интенсивным теплообменом между атмосферой и океаном [13], что, вероятно, и объясняет высокую когерентность в нем циклов NAO и T_{2m} .

Связь NAO и течения Гольфстрим ранее отмечалась в [14; 15]. В частности, в [15] было показано наличие цикла с периодом 8,3–9,5 лет в изменчивости индекса Гольфстрима (Gulf Stream

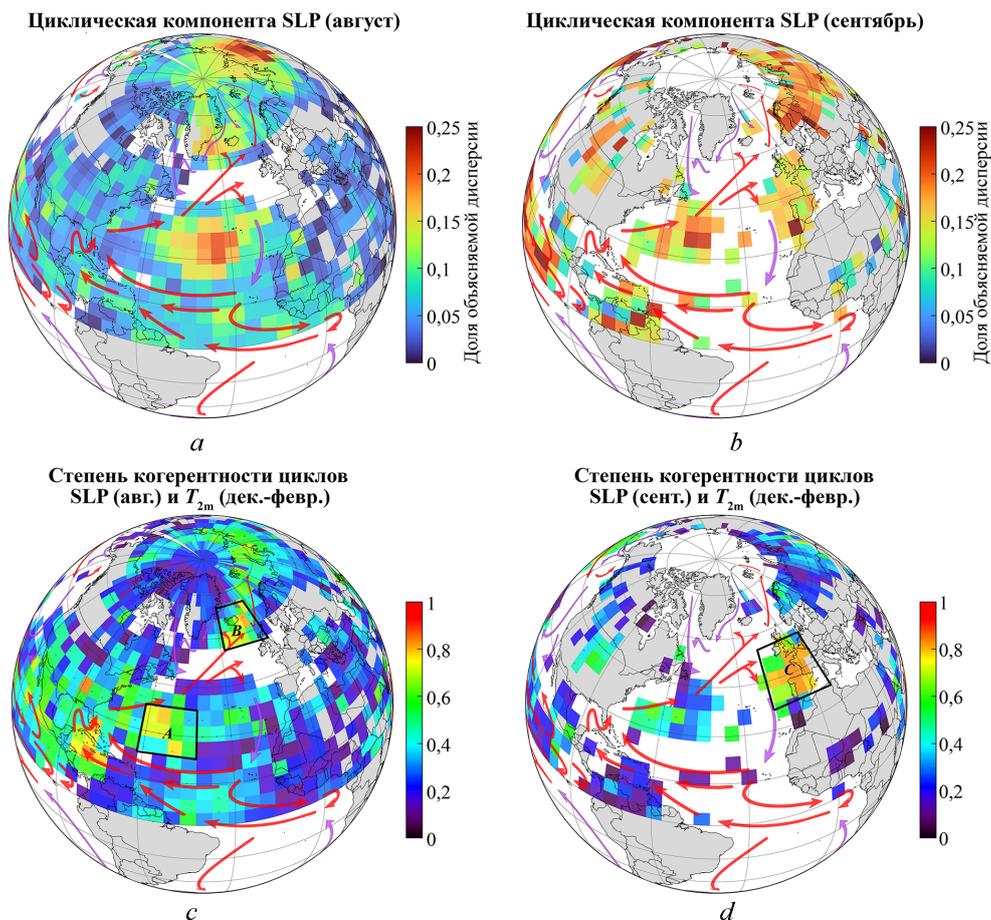


Рис. 2. Доля дисперсии давления на уровне моря в августе (*a*) и сентябре (*c*), объясняемая квази-8-летним циклом, и степень его когерентности аналогичному циклу средней зимней температуры воздуха в Беларуси (*b, d*)

Fig. 2. Share of sea level pressure variance in August (*a*) and September (*c*) explained by the quasi-8-year cycle and the degree of coherence of this cycle to the similar cycle of mean winter air temperature in Belarus (*b, d*)

North Wall), характеризующего расположение его северной границы, причем выявленный цикл также оказался близок по фазе к циклу NAO.

Теперь рассмотрим когерентность квази-8-летних циклов в полях давления и температуры с учетом временного лага (рис. 2).

На рис. 2, *a* и *b* представлены результаты расчетов доли общей дисперсии SLP в августе и сентябре, объясняемой колебанием с периодом 7–10 лет. В августе этот цикл охватывает практически все северное полушарие с максимальным проявлением в центре субтропического антициклонического круговорота Северной Атлантики, в районе Гренландии и Исландии, а также в Сибири. В указанных районах данный цикл определяет до четверти общей изменчивости SLP. Карта степени когерентности этого цикла с квази-8-летним циклом зимней температуры воздуха Беларуси (T_{2m}) позволяет выделить несколько районов Северной Атлантики, аномалии SLP в которых могут рассматриваться в качестве предикторов ее долгосрочного прогноза. К таким районам, в частности, относятся: западно-центральная область субтропического антициклонического круговорота (регион *A* на рис. 2, *c*), область Исландского минимума (регион *B*) и регион Мексиканского залива, однако последний, в силу слабого проявления в нем квази-8-летнего цикла (рис. 2, *a*), не рассматривался в качестве потенциального предиктора.

В сентябре квази-8-летний цикл SLP имеет гораздо меньший пространственный охват, чем в предыдущем месяце, однако является более мощным. Один максимум его проявления в поле SLP все также приходится на область субтропического круговорота, а второй (регион *C* на рис. 2, *d*), в отличие от августа месяца, смещается к западной Европе. Изменения SLP в этом 8-лет-

нем цикле высоко когерентны с изменениями зимней температуры в Беларуси, что обуславливает выбор еще одного ее предиктора.

В ноябре квази-8-летний цикл SLP проявляется на периферии субтропического антициклонического круговорота Северной Атлантики и в области Гренландии, однако степень его когерентности с зимней температурой воздуха в Беларуси невысока – не более 0,5.

Таким образом, для сезонного прогноза температуры воздуха в Беларуси с заблаговременностью 2 месяца можно рекомендовать по меньшей мере три перспективных предиктора: аномалии давления на уровне моря в районах, отмеченных боксами *A*, *B* и *C* на рис. 2, *c* и *d*.

Модель сезонного прогноза температуры воздуха. К настоящему времени разработано большое количество моделей прогноза временных рядов с учетом лаговых предикторов, начиная от достаточно простых и интерпретируемых аддитивных моделей типа Prophet и NeuralProphet и заканчивая глубокими нейронными сетями, такими как DeepAR, N-BEATS, N-HiTS и Temporal Fusion Transformer. Все они хорошо описаны в специализированных интернет-источниках и реализованы в известных библиотеках глубокого машинного обучения, таких как PyTorch Forecasting (2020), Darts (2020) и NeuralForecast (2022).

Достаточно хорошим кандидатом на роль модели прогноза временных рядов, включающих общие квазистационарные колебания, является вышедшая в апреле 2023 г. модель TimesNet, которая достигает самых передовых результатов при решении таких задач анализа временных рядов, как прогнозирование, классификация, обнаружение аномалий и автозаполнение пропусков.

Архитектура модели TimesNet приведена на рис. 3. В отличие от предыдущих моделей прогноза многомерных временных рядов, она использует архитектуру на основе сверточных нейронных сетей по типу Inception, применяемых в задачах компьютерного зрения. Модель способна распознавать периодические компоненты целевой переменной и ее предикторов и учитывать их внутрипериодные и межпериодные взаимосвязи.

Модель TimesNet обучалась на данных наблюдений за температурой воздуха в Беларуси и сеточных данных HadSLP2 по давлению на уровне моря за период с 1933 по 2001 г. Период с 2002 по 2016 г. использовался для оптимизации гиперпараметров модели, а период с 2017 по 2023 г. – для тестирования оптимизированной модели. При этом необходимо отметить, что данные HadSLP2, имеющиеся в свободном доступе, заканчиваются 2019 г. Начиная с 2020 г. для вычисления предикторов температуры воздуха в Беларуси авторами используются данные реанализа NCEP-NCAR месячного разрешения. Временные ряды предикторов, вычисляемых с применением двух отмеченных выше комплектов данных, «сшивались» методом линейной регрессии на основе общего для них периода 1948–2019 гг.

Результаты сезонного прогноза температуры на основе выявленных предикторов и модели TimesNet для обучающих, валидационных и тестовых данных представлены на рис. 4. Областью

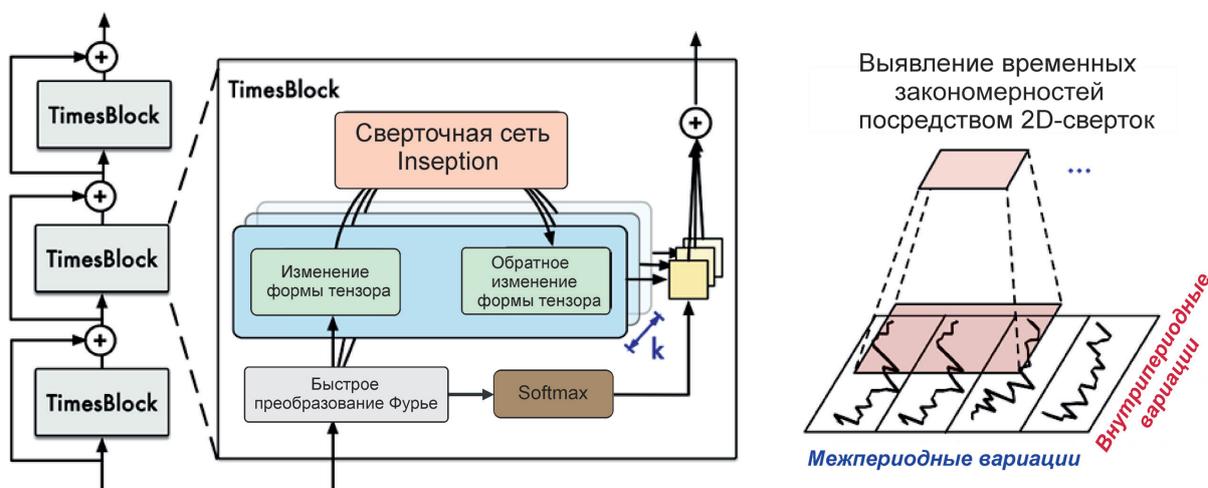


Рис. 3. Общая структура модели TimesNet

Fig. 3. General structure of TimesNet model

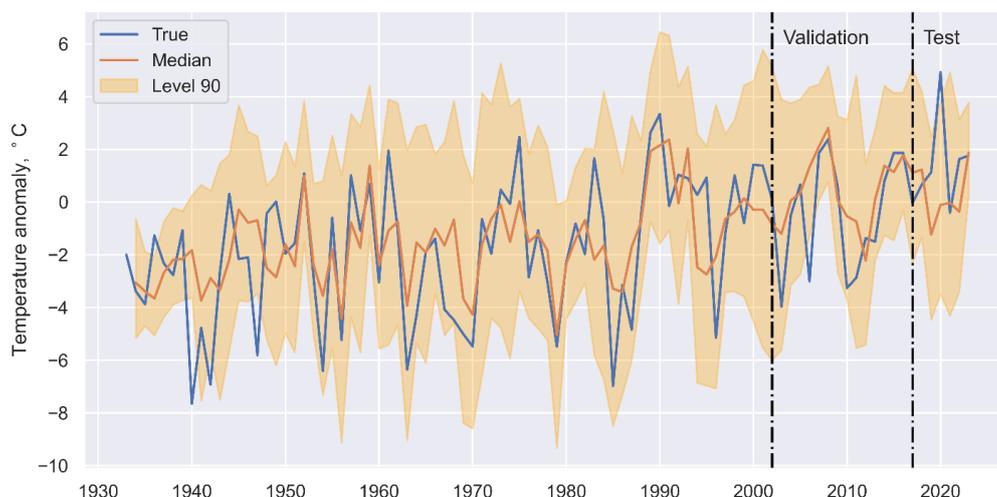


Рис. 4. Фактические и предсказанные моделью TimesNet значения средней зимней температуры воздуха в Беларуси с лагом 2 месяца

Fig. 4. Actual and predicted by TimesNet model values of mean winter air temperature in Belarus with a lag of 2 months

с заливкой показан 90 %-й межквартильный размах прогноза. В целом для всего временного ряда достигается коэффициент корреляции фактических и предсказанных значений температуры 0,66. Прогноз для тестовой части ряда также оказался вполне удовлетворительным, за исключением рекордно теплой зимы 2019–2020 гг., когда температура воздуха в Беларуси устойчиво превышала нулевую отметку на протяжении всего зимнего периода.

Сезонный прогноз температуры, как правило, дается в градациях ниже нормы, норма и выше нормы, поэтому рассмотрим оценки качества такого прогноза моделью TimesNet. Под нормой будем понимать значения температуры, расположенные между 33-м и 66-м процентилем ее распределения. Аномалии ниже и выше нормы соответственно будем относить к значениям температуры ниже 33-го и выше 66-го перцентилей. Таким образом в каждую градацию попадает примерно одинаковое количество точек (33 % от их общего количества).

Метрики качества сезонного прогноза температуры в указанной градации приведены в таблице. Точность многоклассового прогноза можно интерпретировать как долю объектов, правильно отнесенных моделью к данному классу, из общего числа объектов этого класса, спрогнозированных моделью. Метрика «полнота» показывает, какую долю объектов данного класса модель спрогнозировала правильно. F1-мера – это среднее гармоническое значение точности и полноты, являющееся сбалансированной мерой как ложноположительных, так и ложноотрицательных результатов.

Метрики производительности модели TimesNet в задаче прогноза средней зимней температуры в градации ниже нормы, норма и выше нормы

Performance metrics of the TimesNet model in the task of forecasting average winter temperature in the gradations below normal, normal and above normal

Аномалия Anomaly	Точность Precision	Полнота Recall	F1-мера F1-score
Ниже нормы	0,70	0,53	0,60
Норма	0,43	0,67	0,52
Выше нормы	0,70	0,47	0,56
Макрометрики	0,61	0,56	0,56

Для всех классов температурной аномалии вычисленные метрики качества прогноза превосходят аналогичные метрики для случая простого угадывания. Взвешенные макросредние метрики показывают, что модель достоверно спрогнозировала 56 % аномалий температуры, 61 % данных моделью прогнозов соответствуют действительности. При этом точность прогноза ано-

малый температуры выше и ниже нормы составила 70 %, что более чем в 2 раза превышает точность случайного угадывания.

Закключение. Предложены новые подходы к выделению потенциальных лаговых предикторов для долгосрочного метеорологического прогноза на основе анализа степени пространственно-временной когерентности устойчивого во времени квази-8-летнего колебания метеорологических полей. Проявление данного цикла в поле приземной температуры связано с очагами глубокой конвекции в морях Северной Атлантики, являющейся неотъемлемой частью Атлантической меридиональной термохалинной циркуляции.

Результаты исследования показывают, что можно выделить по меньшей мере три района Северной Атлантики, в которых квази-8-летнее колебание с лагом 2–3 месяца синхронизировано с колебанием зимней температуры в Беларуси: западная и центральная область субтропического антициклонического круговорота, область Исландского минимума и побережье Западной Европы. Аномалии давления на уровне моря в указанных регионах Атлантики для августа и сентября являются эффективными предикторами зимней температуры в Беларуси. Соответствующий прогноз реализован на основе передовой нейросетевой модели прогноза временных рядов TimesNet.

Дальнейшее повышение качества долгосрочного и сверхдолгосрочного прогнозирования (заблаговременность более сезона) температуры может быть достигнуто за счет учета еще одного мощного цикла в климате Земли – с периодом около 60 лет. Этот цикл отчетливо проявляется в индексе атлантической мультидекадной осцилляции (АМО) и индексе североатлантического колебания (NAO). Поскольку последний определяет траектории циклонов, и как следствие, и погодные условия на территории Европы в зимний период, то знак его изменения в квази-60-летнем цикле может рассматриваться в качестве категориального признака при долгосрочном прогнозе зимней температуры в Беларуси.

Еще одним направлением повышения качества долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов температуры можно указать использование так называемых *глобальных моделей* прогноза временных рядов, способных обучаться сразу на большой совокупности однотипных временных рядов. В нашем случае – это данные наблюдений за температурой воздуха на множестве метеорологических станций Беларуси. Такие модели, как правило, обладают хорошей способностью выявления общих закономерностей и зависимостей, присущих исследуемым динамическим процессам, и наиболее удобны в практическом применении, поскольку позволяют составлять прогноз сразу для нескольких пунктов наблюдений.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № X23РНФ-122).

Acknowledgments. The study was carried out with financial support from the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant no. X23РНФ-122).

Список использованных источников

1. Долгосрочные метеорологические прогнозы в Гидрометцентре России / Р. М. Вильфанд [и др.] // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2019. – № 4 (374). – С. 12–36.
2. Долгосрочные метеорологические прогнозы / Н. А. Багров [и др.]. – Л., 1985. – 248 с.
3. Dominant imprint of Rossby waves in the climate network / Y. Wang [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2013. – Vol. 111. – Art. 138501. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.111.138501>
4. Review of tropical-extratropical teleconnections on intraseasonal time scales / C. Stan [et al.] // Rev. Geophys. – 2017. – Vol. 55, N 4. – P. 902–937. <https://doi.org/10.1002/2016rg000538>
5. The impact of strong El Niño and La Niña events on the North Atlantic / S. C. Hardiman [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 2019. – Vol. 46, N 5. – P. 2874–2883. <https://doi.org/10.1029/2018gl081776>
6. Gastineau, G. Influence of the North Atlantic SST variability on the atmospheric circulation during the twentieth century / G. Gastineau, C. Frankignoul // J. Climate. – 2015. – Vol. 28, N 4. – P. 1396–1416. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00424.1>
7. Seip, K. L. The North Atlantic Oscillations: cycle times for the NAO, the AMO and the AMOC / K. L. Seip, Ø. Grøn, H. Wang // Climate. – 2019. – Vol. 7, N 3. – Art. 43. <https://doi.org/10.3390/cli7030043>
8. Rahmstorf, S. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years / S. Rahmstorf // Nature. – 2002. – Vol. 419, N 12. – P. 207–214. <https://doi.org/10.1038/nature01090>
9. Полонский, А. Б. Североатлантическое колебание и бюджет тепла верхнего слоя Северной Атлантики / А. Б. Полонский, П. А. Сухонос // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2019. – № 4. – С. 67–100. <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2019-4-67-100>

10. Recent slowing of Atlantic overturning circulation as a recovery from earlier strengthening / L. Jackson [et al.] // *Nature Geosci.* – 2016. – Vol. 9, N 7. – P. 518–522. <https://doi.org/10.1038/ngeo2715>
11. Федоров, А. М. Локализация областей глубокой конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, Лабрадор и Ирмингера / А. М. Федоров, И. Л. Башмачников, Т. В. Белоненко // *Вестн. СПбГУ. Науки о Земле.* – 2018. – Т. 63, вып. 3. – С. 345–362. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.306>
12. Skillful prediction of northern climate provided by the ocean / M. Årthun [et al.] // *Nature Communications.* – 2017. – Vol. 8. – Art. 15875. <https://doi.org/10.1038/ncomms15875>
13. Нестеров, Е. С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан / Е. С. Нестеров. – М., 2013. – 144 с.
14. The relation between the North Atlantic Oscillation and SSTs in the North Atlantic basin / W. Wang [et al.] // *J. Clim.* – 2004. – Vol. 17, N 24. – P. 4752–4759. <https://doi.org/10.1175/jcli-3186.1>
15. McCarthy, G. D. Gulf stream variability in the context of quasi-decadal and multidecadal atlantic climate variability / G. D. McCarthy, T. M. Joyce, S. A. Josey // *Geophys. Res. Lett.* – 2018. – Vol. 45, N 20. – P. 11257–11264. <https://doi.org/10.1029/2018gl079336>

References

1. Vilfand R. M., Zaripov R. B., Kiktev D. B., Kruglova E. N., Kryjov V. N., Kulikova I. A., Tischenko V. A., Tolsyach M. A., Khan V. M. Long-range forecasting at Hydrometeorological Center of Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological Research and Forecasting*, 2019, no. 4 (374), pp. 12–36 (in Russian).
2. Bagrov N. A., Kondratovich K. V., Ped D. A., Ugryumov A. I. *Long-term meteorological forecasts*. Leningrad, 1985. 248 p. (in Russian).
3. Wang Y., Gozolchiani A., Ashkenazy Y., Berezin Y., Guez O., Havlin Sh. Dominant imprint of Rossby waves in the climate network. *Physical Review Letters*, 2013, vol. 111, art. 138501. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.111.138501>
4. Stan C., Straus D. M., Frederiksen J. S., Lin H., Maloney E. D., Schumacher C. Review of tropical-extratropical teleconnections on intraseasonal time scales. *Reviews of Geophysics*, 2017, vol. 55, no. 4, pp. 902–937. <https://doi.org/10.1002/2016rg000538>
5. Hardiman S. C., Dunstone N. J., Scaife A. A., Smith D. M., Ineson S., Lim J., Fereday D. The impact of strong El Niño and La Niña events on the North Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 2019, vol. 46, no. 5, pp. 2874–2883. <https://doi.org/10.1029/2018gl081776>
6. Gastineau G., Frankignoul C. Influence of the North Atlantic SST variability on the atmospheric circulation during the twentieth century. *Journal of Climate*, 2015, vol. 28, no. 4, pp. 1396–1416. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00424.1>
7. Seip K. L., Grøn Ø., Wang H. The North Atlantic Oscillations: cycle times for the NAO, the AMO and the AMOC. *Climate*, 2019, vol. 7, no. 3, art. 43. <https://doi.org/10.3390/cli7030043>
8. Rahmstorf S. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature*, 2002, vol. 419, no. 12, pp. 207–214. <https://doi.org/10.1038/nature01090>
9. Polonsky A. B., Sukhonos P. A. North Atlantic Oscillation and upper layer heat balance in the North Atlantic. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*, 2019, no. 4, pp. 67–100 (in Russian). <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2019-4-67-100>
10. Jackson L. C., Peterson K. A., Roberts C. D., Wood R. A. Recent slowing of Atlantic overturning circulation as a recovery from earlier strengthening. *Nature Geoscience*, 2016, vol. 9, no. 7, pp. 518–522. <https://doi.org/10.1038/ngeo2715>
11. Fedorov A. M., Bashmachnikov I. L., Belonenko T. V. Localization of areas of deep convection in the Nordic seas, the Labrador sea and the Irminger sea. *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle = Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 345–362 (in Russian). <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.306>
12. Årthun M., Eldevik T., Viste E., Drange H., Furevik T., Johnson H. L., Keenlyside N. S. Skillful prediction of northern climate provided by the ocean. *Nature Communications*, 2017, vol. 8, art. 15875. <https://doi.org/10.1038/ncomms15875>
13. Nesterov E. S. *North Atlantic Oscillation: atmosphere and ocean*. Moscow, 2013. 144 p. (in Russian).
14. Wang W., Anderson B. T., Kaufmann R. K., Myneni R. B. The Relation between the North Atlantic Oscillation and SSTs in the North Atlantic Basin. *Journal of Climate*, 2004, vol. 17, no. 24, pp. 4752–4759. <https://doi.org/10.1175/jcli-3186.1>
15. McCarthy G. D., Joyce T. M., Josey S. A. Gulf Stream variability in the context of quasi-decadal and multidecadal atlantic climate variability. *Geophysical Research Letters*, 2018, vol. 45, no. 20, pp. 11257–11264. <https://doi.org/10.1029/2018gl079336>

Информация об авторах

Лысенко Сергей Александрович – д-р физ.-мат. наук, профессор, директор. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lysenko.nature@gmail.com.

Логин Владимир Федорович – академик, д-р географ. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nature@ecology.basnet.by.

Information about the authors

Lysenko Sergey A. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Director. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lysenko.nature@gmail.com.

Loginov Vladimir F. – Academician, D. Sc. (Geography), Professor, Chief Researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nature@ecology.basnet.by.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**TECHNICAL SCIENCES**

UDC 537.622.4:621.318.1

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-508-516>

Received 15.11.2022

Поступило в редакцию 15.11.2022

**Olga F. Demidenko¹, Aliaksandr L. Zhaludkevich¹, Artsiom O. Laryn¹,
Gennady A. Govor¹, Sun Haibo², Chen Dongchu², Stsiapan N. Yankevich³**

¹*Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

²*School of Materials Science and Hydrogen Energy, Foshan University, Foshan, China*

³*JSC “Instrument-Making Plant “Optron”, Minsk, Republic of Belarus*

**STRUCTURE, SOFT MAGNETIC PROPERTIES OF Fe-BASED MAGNETIC
COMPOSITES AND ITS PRACTICAL APPLICATION**

(Communicated by Corresponding Member Valery M. Fedosyuk)

Abstract. A multi-stage technique for applying insulating coatings to metal powder particles has been developed in order to create a new class of Fe-based soft magnetic materials with improved characteristics. The density value calculated from the data of X-ray diffraction analysis is approximately 3 % higher than the experimentally measured values, which are 7.4–7.45 g/cm³. The low porosity of the composites is confirmed by the SEM and EDX results. The proposed method of encapsulation of iron powder with an oxide layer is a highly economical method for applying coatings of various chemical compositions to metal powders, and can be widely used in practice to obtain electrical materials. Comprehensive studies of the properties of the obtained samples of powder composite materials based on ABC100.30 iron, the particles of which are encapsulated with phosphorus oxide, have been carried out. It has been established that in a field of 1.5 T, the losses at a frequency of 1 kHz decrease 10 times with an increase in the thickness to 30 nm. The synthesized materials are recommended for use in the development of various types of high-frequency electric motors, generators, chokes, magnetic circuits and electrodes for high-frequency welding and other applications.

Keywords: Fe-based soft magnetic composites, insulating coatings, crystal structure, morphology, electromagnetic losses, magnetic permeability

For citation. Demidenko O. F., Zhaludkevich A. L., Laryn A. O., Govor G. A., Sun Haibo, Chen Dongchu, Yankevich S. N. Structure, soft magnetic properties of Fe-based magnetic composites and its practical application. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 6, pp. 508–516. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-508-516>

**О. Ф. Демиденко¹, А. Л. Желудкевич¹, А. О. Ларин¹, Г. А. Говор¹, Сунь Хайбо²,
Чен Дунчу², С. Н. Янкевич³**

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

²*Школа материаловедения и водородной энергетики Фошаньского университета,
Фошань, Китайская Народная Республика*

³*ОАО «Приборостроительный завод «Оptron», Минск, Республика Беларусь*

**СТРУКТУРА, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА Fe-СОДЕРЖАЩИХ
МАГНИТНЫХ КОМПОЗИТОВ И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ**

(Представлено членом-корреспондентом В. М. Федосюком)

Аннотация. Разработана многостадийная методика нанесения изоляционных покрытий на частицы металлических порошков с целью создания нового класса магнитомягких материалов с улучшенными характеристиками. Величина плотности, рассчитанная из данных рентгеноструктурного анализа, примерно на 3 % больше, чем непосредственно измеренных значений, которые составляют 7,4–7,45 г/см³. Низкая пористость композитов подтверждается

результатами SEM и EDX. Предложенный метод капсулирования порошка железа оксидным слоем является высокоэкономичным методом для нанесения покрытий различного химического состава на металлические порошки и может быть широко использован в практике для получения электротехнических материалов. Проведены комплексные исследования свойств полученных образцов порошковых композиционных материалов на основе железа ABC100.30, частицы которого капсулированы оксидом фосфора. Установлено, что в поле 1,5 Тл потери при частоте 1 кГц снижаются в 10 раз. Синтезированные материалы рекомендуются для использования при разработке различного рода высокочастотных электродвигателей, генераторов, дросселей, магнитопроводов и электродов для ВЧ сварки и других применений.

Ключевые слова: Fe-содержащие магнитомягкие композиты, изолирующие покрытия, кристаллическая структура, морфология, электромагнитные потери, магнитная проницаемость

Для цитирования. Структура, электромагнитные свойства Fe-содержащих магнитных композитов и их практическое применение / О. Ф. Демиденко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 6. – С. 508–516. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-508-516>

Introduction. Recently, world has been actively developing electric transport and related areas through the creation and production of materials with advanced characteristics for electric machines for various purposes, which is a consequence of the actualization of the climate agenda, in particular, the policy to reduce greenhouse gas emissions into the atmosphere. Economic stimulation of resource conservation, development and implementation of environmentally friendly technologies and equipment in industry, energy, agriculture and transport are priority areas for ensuring environmental security in many states [1; 2]. For this reason, the used electric machines are subject to special requirements, such as high efficiency, high torque and power density, a wide speed range, maintainability and reliability [3].

The desire to improve the energy efficiency and economy of materials constantly forces researchers to improve their properties. Soft magnetic materials are an important subclass of magnetic materials that are able to quickly switch their magnetic polarization in conditions of weak applied magnetic field and have low energy losses, which finds important application in the creation of electric motors, transformers, inductors or sensors [4; 5].

The growing demand for miniaturization of electronic components coupled with higher operating frequencies calls for new functional materials that combine reduced core EMI, higher power density and well-defined performance at elevated temperatures. Thus, advanced research and development continues to expand the range of new available soft magnetic materials with improved properties suitable for specific applications [6–8].

An information analysis of a large amount of data on the study of technological schemes for obtaining powder magnetically soft materials and the study of the magnetic and physico-mechanical properties of experimental samples shows that one of the promising directions for the further development of such materials is the creation of materials based on nanocrystalline powders [9]. A unique combination of magnetic properties is observed in nanocrystalline alloys based on the Fe-Si-B system of the “Finemet” type ($\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$) [10] with a mixed amorphous-crystalline structure and a grain size of ~10 nm, which makes it possible to obtain saturation induction not less than 1.0 T and high initial magnetic permeability. The absence of a domain structure ensures a low coercive force (5–10 A/m), a correspondingly small area of the hysteresis loop, and, as a consequence, low magnetization reversal losses in such materials.

Currently, soft magnetic composite materials are gradually replacing the widely used laminated electrical steel for the magnetic circuits of electrical devices manufacture. Soft magnetic composites are a special class of ferromagnetic materials for electromagnetic applications, consisting of ferromagnetic particles isolated from each other, which leads to a decrease in eddy currents and, consequently, a decrease in overall energy losses [11]. The eddy current that occurs in the core leads to losses in the form of heating. To reduce these eddy current losses, an insulating film must be formed on the surface of the soft magnetic material particles to prevent conduction between the particles. In the literature, there are similar studies of the formation of insulating coatings on the surface of particles based on resins, phosphates, oxides, and borates deposited by various methods, such as oxidation, vapor and liquid phase deposition, mechanical alloying, and others chemical methods¹ [12; 13]. An analysis of the available

¹ Ferromagnetic particle surface coating layers for obtaining soft magnetic composites (SMCs): patent no WO2018035595A1 / M. V. F. da Luz, R. Carlson, N. Sadowski, G. Hammes, V. Drago, G. Tontini, A. N. Klein, C. Binder, J. B. Rodrigues Neto, N. J. Batistela, M. T. Daros, A. I. Ramos Filho, C. Schmitz, R. D. A. Elias. 2018.

literature data on the methods for encapsulating a metal powder with a thin oxide layer showed that they do not provide a sufficiently high-quality coating and are ineffective. The main requirements for coatings can be formulated as follows: the coating layer must be continuous and uniform in thickness; the resistivity of the layer should be 10^2 – 10^6 Ohm cm.

Compared to electrical steel, which is a sheet material, the use of soft magnetic composites in the form of encapsulated powder results in virtually no material loss at the manufacture of electromagnetic components, compared with the standard technology, in which up to 40 % of electrical steel is remelted. One of the important advantages is that such materials make it possible to design and create a much greater variety of forms of components of electrical products, including the 3D printing method, while maintaining isotropic magnetic properties [14; 15].

An important factor is the increase in the efficiency of manufacturing products and the reduction of technological costs. Powder composite materials are characterized by thermal and magnetic isotropy. Many new electrical machines with 3D-flow control are only possible due to isotropic properties. In addition, the powder is pressed directly into the desired shape and then heat treated. This means that components with complex geometries can be manufactured easily and efficiently.

The purpose of this work was to study the effect of the thickness of the encapsulating insulating layer based on phosphorus oxide deposited on pure iron powder particles on the magnitude of the electromagnetic characteristics.

Materials and experimental methods. Taking into account the insulating coating requirements outlined above, a new method for applying oxide coatings to the surface of metallic iron particles has been developed by combining the encapsulation methods listed above, which makes it possible to obtain a given composition with given magnetic parameters and resistivity, which can be widely used in practice. The essence of the method consists in preliminary joint mixing of the powder with the addition of water-soluble salts and their thermal decomposition to oxides, followed by the formation of oxide coatings on the iron surface (Fig. 1).

In order to obtain encapsulated materials with good electrical characteristics, it is very important that the initial metal powders have a high chemical purity. These requirements are met by water-atomized iron powder ABC100.30, which contains a small amount of carbon 0.002 wt. % and oxygen 0.05 wt. %. Studies of the granulometric composition of ABC100.30 iron powders were carried out using a laser analyzer “Mastersizer-2000” from Malvern (Great Britain), and its results are presented in Table 1. The analysis of the given data shows that 83 % of the volume of the entire powder are particles with sizes from 20 to 178 microns.

Table 1. Granulometric composition of iron powders ABC100.30

Particles size (mkm)	Volume (%)	Particles size (mkm)	Volume (%)
0.100		7.179	
0.291	0.02	20.895	2.73
0.847	1.25	60.822	27.40
2.466	2.23	177.040	56.08
7.179	2.19	515.325	8.11

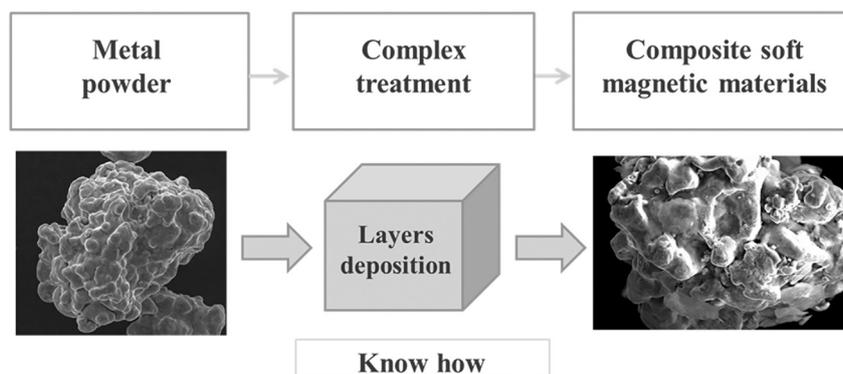


Fig. 1. Scheme for obtaining a magnetically soft composite material from metal powders

The method for manufacturing encapsulated powders and creating products from them is a multi-stage process that includes the following main operations. At the first stage, an operation is carried out for the reaction deposition of insulating coatings from the gas phase at a temperature of 150–200 °C¹. Iron powder in a special reactor is transferred to a suspended state in a gaseous medium containing vapors of the deposited oxide material together with solvent vapors. Solvent vapors, which were used as ethanol, gasoline, acetone, isopropyl alcohol, and others, are gradually pumped out of the reactor. A phosphorus oxide insulating coating was applied to the surface of the iron particles. The insulating coating was formed in the form of one, two and three layers. The thickness of one layer of the insulating coating was determined based on the specific surface area of iron particles, the volume of the introduced oxidizer, and the deposition time, and was about ~10 nm.

The second stage is the operation of applying a wax-based lubricant to the surface of the isolated iron particles in an amount not exceeding 0.025 wt. % in the reactor at a temperature of 150–200 °C with constant vacuum pumping. Further, by hydrostatic pressing of encapsulated powders, products are manufactured in special molds under a pressure of 0.7–0.8 GPa under normal conditions. Pressed products are subjected to heat treatment to normalize physical parameters. Products are annealed at a temperature of 450 °C for 1.0–1.5 hours in special autoclaves in a nitrogen atmosphere or in air, depending on the requirements.

The developed application technology is very simple and easily scaled. The finished composite has a low cost compared to analogues.

The crystal structure of the composites was studied on a DRON-3 M diffractometer in CuK α radiation in $20^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$ angle range at room temperature. The morphology and chemical composition of the powders were studied by scanning electron microscopy (SEM) using a Hitachi SEM, Zeiss microscope. Prior to the study, the surface of the pressed composite was preliminarily ground and polished to remove the surface oxide layer. To study the magnetic properties, samples of a composite magnetic material from an encapsulated powder were fabricated rings with dimensions of $24 \times 3 \times 8$ mm and then subjected to annealing. The density of finished products ranged from 7.4 to 7.45 g/cm³.

Measurements of magnetic properties were performed both on an developed in our laboratory express magnetometer and using a calibrated IFM06 Fluxmeter. The value of the electromagnetic parameters was calculated from the magnetization reversal curves of the samples.

Structure and morphology characterization. On Fig. 2 are shown X-ray diffraction patterns of ABC100.30+P₂O₅ composites. The results of the analysis of obtained by X-ray diffraction data showed that only one α -Fe phase of pure iron is present in the samples. Composites have a cubic unit cell with the space group Im3m. The parameter is $a \approx 0.2867 \pm 0.0003$ nm. In the small angles 25–35° range diffuse scattering is observed, which is inherent in the amorphous P₂O₅ phase. With an increase in the thickness of the insulating layer deposited on the iron particles, the scattering intensity increases. Based on the results of X-ray diffraction determination of the unit cell volume $V = a^3$, the theoretical density of composite materials was calculated. The calculated theoretical density value is approximately 3 % higher than the density values obtained by direct measurement by hydrostatic weighing (7.4–7.45 g/cm³). This is consistent with the fact that the pressing fill is about 95 %. Such a difference in the density values is due to the low porosity of the synthesized composites.

SEM-images of the particles of the initial and phosphide encapsulated ABC100.30 iron powders and the surface of the pressed and sintered composite are shown in Fig. 3, *a–c*. Particles of initial water-atomized iron and after coatings application have a rather complex irregular morphology, which subsequently makes it possible to obtain dense composites with the necessary electrical characteristics. The formation of phosphide layer on the particles surface can be judged by the change in the contrast of the image compared to the original ABC100.30. The particles of the encapsulated powder acquire smoother shapes. The applied layer is distributed fairly evenly. In the image of the pressed composite in Fig. 3, *c* the grain boundaries of the composite consisting of encapsulated iron particles are clearly observed. The structure of the pressed sample is dense with small inclusions of pores, which confirms the results of density studies.

¹ Method for manufacturing a composite magnetically soft material: patent of Russian Federation No. 2465669 / G. A. Govor, V. I. Mitsyuk, A. V. Tamonov. Publ. 27.10.2012.

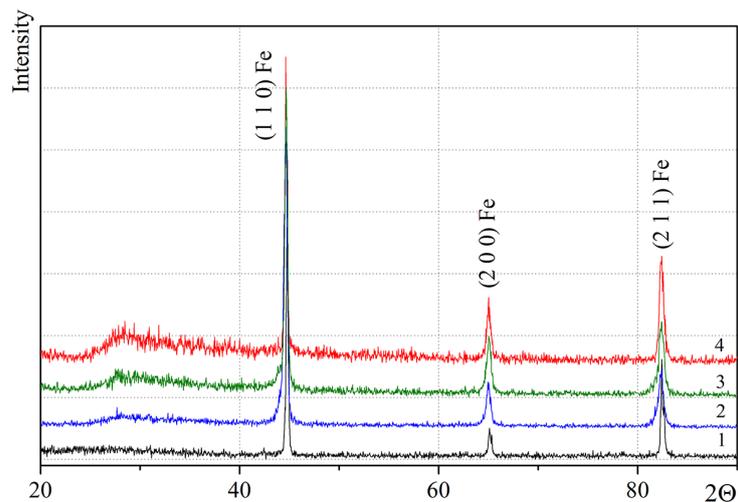


Fig. 2. Experimental X-ray diffraction patterns of composites based on phosphide-encapsulated iron powder ABC100.30: 1 – initial ABC100.30; 2 – encapsulation layer with thickness of 10 nm; 3 – 20 nm; 4 – 30 nm

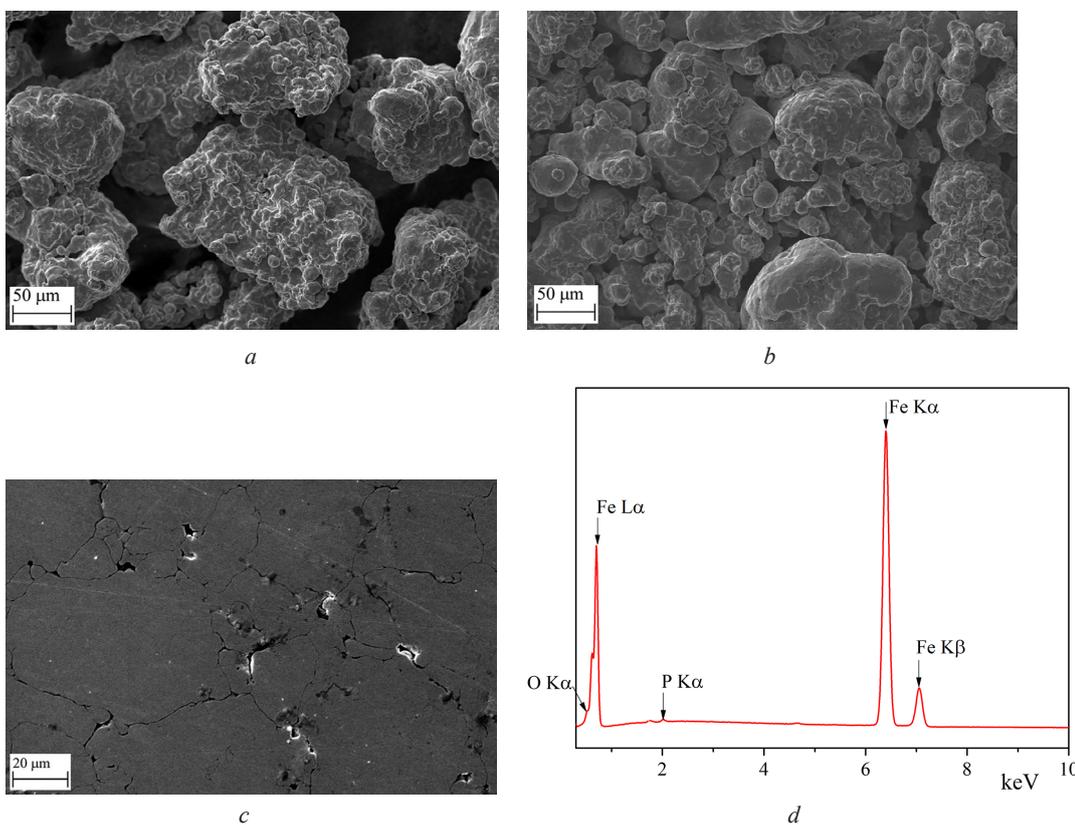


Fig. 3. *a* – SEM-image of the initial ABC100.30 iron powder; *b* – SEM-image of phosphide encapsulated iron powder ABC100.30 particles; *c* – SEM-image of the surface of a pressed composite based on phosphide encapsulated iron powder ABC100.30; *d* – spectrum of X-ray fluorescence analysis of the resulting composite

The results of chemical analysis by energy dispersive X-ray (EDS) spectroscopy are shown in Fig. 3, *d*, as well as in Table 2. The total EDS-spectrum of the composite surface showed a complex composition consisting of iron (Fe), oxygen (O), phosphorus (P). The map of the distribution of elements showed that oxygen and phosphorus are distributed unevenly throughout the study area, but only along the boundaries of iron particles, where their increased concentration is observed. This proves the formation of a phosphide coating at the grain boundaries and its retention after pressing and annealing.

Table 2. The content of chemical elements in the sample

Chemical element	Weight, %	At., %
O	1.16	3.92
P	0.24	0.42
Fe	98.60	95.66
Total	100.00	100.00

Electromagnetic characterization. Studies of the main electromagnetic characteristics of all obtained composites have been carried out, which is very important for determining the practical potential of the developed materials.

Magnetic hysteresis loops have been obtained in a field of up to 20 kA/m at a frequency of 1 kHz for ABC100.30 powders, the particles of which are encapsulated by insulating coatings of various thicknesses. An analysis of the loops showed that with a change in the coating thickness, a change in the nature of the magnetization reversal is observed from hysteretic when encapsulated by a 10 nm coating to an almost linear hysteresis-free character of magnetization reversal when encapsulated by a 30 nm thick coating. From the obtained hysteresis loops, the losses due to reversal magnetization are calculated and their dependences on the magnetic induction are plotted. An analysis of the calculated data shows that a thin coating on the order of 10 nm does not provides high-quality isolation of particles, which leads to significant reversal magnetization losses. To ensure minimum of reversal magnetization losses, an insulating coating of particles of 20 nm or more is required. The frequency dependences of the magnetic permeability of a material based on ABC100.30 iron powder encapsulated by coatings of various thicknesses in the frequency range up to 1 MHz are plotted. From the analysis of the experimental results, we can conclude that for the case of encapsulation of iron particles by a coating 10 nm thick, the value of the magnetic permeability changes significantly with frequency. With an increase in the coating thickness, the value of the magnetic permeability at a frequency above 10 kHz increases to the values $\mu = 120\text{--}130$. For a material with coated 30 nm thick particles, in a wide frequency range from 1 kHz to 1 MHz, the permeability remains practically unchanged, which is important from the point of view of the practical application of such a material.

Prospects for practical applications. Currently, in the production of electrical machines, known soft magnetic alloys are mainly used, 90 % of these are electrical steels of various types. Such materials have almost reached the limit of their physical, mechanical and operational properties, and in order to create a new generation of products, it is necessary to use a completely new class of soft magnetic materials with improved characteristics, which composite materials developed and studied in this work can be used.

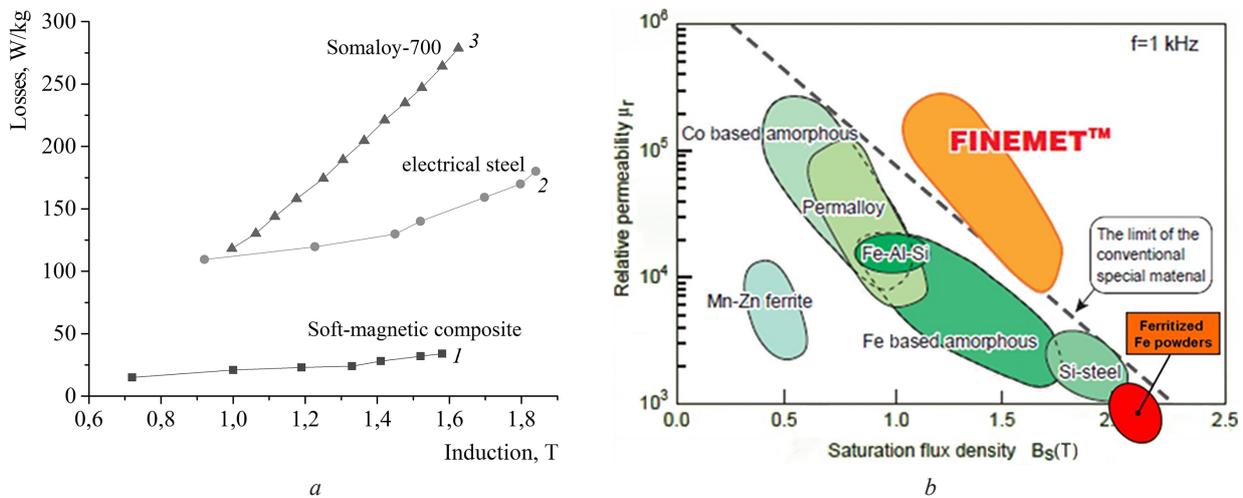


Fig. 4. a – Total electromagnetic losses for a soft magnetic composite based on capsulated iron powder (1), electrical steel 3412 (2) and Hoganes alloy Somaloy-700 (3); b – Relationship between permeability and saturation flux density in several soft magnetic alloys [14]

When comparing the total electromagnetic losses (Fig. 4, *a*) for the developed magnetically soft composite based on capsulated iron powder (1), electrical steel (2) and Somaloy-700 alloy (3), depending on the induction value, it is also seen that the losses for our material are lower. The advantages of a composite magnetic material over electrical steel and other soft magnetic alloys allow for their wider use in electrical machines in order to increase the power density at high rotation speeds with less losses values.

The diagram (Fig. 4, *b*) shows the relationship between permeability and saturation induction of a number of known soft magnetic alloys. It can be seen that composites based on iron powders with encapsulated particles have one of the highest saturation inductions, and surpass all other alloys in this parameter. In Table 3 for comparison it is shown the main parameters of electrical steel, Mn–Zn-ferrites and the investigated magnetic composite material based on iron powder. Our material has a higher value of saturation and working induction, the field dependence of the induction is close to linear, in addition, it is environmentally friendly, has a high electrical resistance, which means lower eddy current losses. And the manufacturability and simplicity of cores production by compacting exceeds the method of sheet assembly from electrical steel. There is practically no waste in the production of magnetic cores.

Table 3. Properties of electrical steel, Mn–Zn ferrite and Fe-based magnetic composite material

Electromagnetic parameters	Electrical steel	Mn–Zn ferrite	Developped SMC
Induction saturation, T	1.8	0.45	2.1
Maximum magnetic permeability	4000–7000	500–4000	500–1000
Dependence of induction on the magnetic field	Nonlinear	Nonlinear	Close to linear
Ecology	Possible noise	Noiseless	Noiseless
Transformer assembling	Complicated	Simple	Simple
Electric resistance	10^{-6} Ohm m	10^6 – 10^9 Ohm m	10^6 – 10^9 Ohm m

The obtained scientific results indicate the possibility of creating components for various electrical devices based on new magnetically soft composite materials. Preliminary calculations have shown that such materials can be used to create high-frequency converters, highly efficient axial electric motors and generators, and magnetic components for a wide range of applications. Their advantage is that the dimensions of similar products are reduced by almost 2 times at the same power at frequencies up to 1 MHz.

Thus, the new composite magnetic material based on iron powder can successfully replace electrical steel in the manufacture of product components such as transformers, inductors, high-speed motors and generators.

Conclusion. New composite magnetosoft materials based on ABC100.30 iron powder encapsulated with phosphorus oxide have been obtained using the developed method. The results of experimental studies have shown that an increased concentration of oxygen and phosphorus is observed along the boundaries of iron particles; an increased concentration is observed at the boundaries of iron powder grains, which proves the formation of a phosphide coating. For obtained composites the regularities of changes in the electromagnetic properties depending on the thickness of the insulating coating have been studied. It has been found that for materials coated with particles 10 nm thick, the magnetization process has a hysteresis character, while for composites with particles coated with a thickness of 30 nm, an almost linear magnetization pattern is observed. With an increase in the coating thickness, the value of the magnetic permeability at a frequency above 10 kHz increases to the values of $\mu = 120$ – 130 . For a material with coated 30 nm thick particles, in a wide frequency range from 1 kHz to 1 MHz, the permeability remains practically unchanged, which is important from the point of view of the practical application of such a material. In comparison with electrical steel and widely used ferrites main parameters the investigated magnetic composite material based on iron powder has a higher values of induction, has a high electrical resistance, which means lower eddy current losses. The developed materials with magnetic permeability $\mu = 100$ – 150 and induction up to 1.8 T are promising for use in the frequency range up to 1 MHz in the manufacture of various types of electrical devices.

Acknowledgements. This research was funded by the Guangdong Provincial Science and Technology Program, Grant no. 2022A0505050082 (Study concept and design) and by the section 4.1.38 “Development and research of electrical insulating materials for stators of reversible electrical machines based on iron-containing encapsulated materials with a given direction of magnetic flux” of the State Scientific Research Program “Materials Science, New Materials and Technologies” for 2021–2025, subprogram “Multifunctional and composite materials” (Experimental investigations, Methodology, Data interpretation).

Благодарности. Работа выполнена при поддержке программы науки и технологий провинции Гуандун, грант № 2022A0505050082 (концепция и дизайн исследования) и задания 4.1.38 «Разработка и исследование электроизоляционных материалов для статоров обратимых электрических машин на основе железосодержащих капсулированных материалов с заданным направлением магнитного потока» Государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 гг. подпрограммы «Многофункциональные и композиционные материалы» (экспериментальные исследования, методология, интерпретация данных).

References

1. Peiseler L., Cabrera Serrenho A. How can current German and EU policies be improved to enhance the reduction of CO₂ emissions of road transport? Revising policies on electric vehicles informed by stakeholder and technical assessments. *Energy Policy*, 2022, vol. 168, art. 113124. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113124>
2. Chau K.-T., Li W., Lee C. H. T. Challenges and opportunities of electric machines for renewable energy. *Progress in Electromagnetics Research B*, 2012, vol. 42, pp. 45–74. <https://doi.org/10.2528/pierb12052001>
3. Fassbender D., Zakharov V., Minav T. Utilization of electric prime movers in hydraulic heavy-duty-mobile-machine implement systems. *Automation in Construction*, 2021, vol. 132, art. 103964. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103964>
4. Shokrollahi H., Janghorban K. Soft magnetic composite materials (SMCs). *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 189, no. 1–3, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.02.034>
5. Birčáková Z., Kollár P., Weidenfeller B., Füzér J., Bureš R., Fáberová M. Reversible and irreversible magnetization processes along DC hysteresis loops of Fe-based composite materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 483, pp. 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.03.115>
6. Guan W. W., Shi X. Y., Xu T. T., Wan K., Zhang B. W., Liu W., Su H. L., Zou Z. Q., Du Y. W. Synthesis of well-insulated Fe–Si–Al soft magnetic composites via a silane-assisted organic/inorganic composite coating route. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2021, vol. 150, art. 109841. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2020.109841>
7. Zhang Y., Dong Y., Zhou B., Chi Q., Chang L., Gong M., Huang J., Pan Y., He A., Li J., Wang X. Poly-para-xylylene enhanced Fe-based amorphous powder cores with improved soft magnetic properties via chemical vapor deposition. *Materials & Design*, 2020, vol. 191, art. 108650. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108650>
8. Wu C., Gao X., Zhao G., Jiang Y., Yan M. Two growth mechanisms in one-step fabrication of the oxide matrix for FeSiAl soft magnetic composites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 452, pp. 114–119. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.12.032>
9. Ashby M. F., Ferreira P., Schodek D. L. *Nanomaterials, Nanotechnologies and Design: An Introduction for Engineers and Architects*. Butterworth-Heinemann, 2009. 560 p. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-8149-0.x0001-3>
10. Gheiratmand T., Madaah Hosseini H. R. Finemet nanocrystalline soft magnetic alloy: Investigation of glass forming ability, crystallization mechanism, production techniques, magnetic softness and the effect of replacing the main constituents by other elements. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 408, pp. 177–192. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.02.057>
11. Shokrollahi H., Janghorban K. Different annealing treatments for improvement of magnetic and electrical properties of soft magnetic composites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, vol. 317, no. 1–2, pp. 61–67. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.04.011>
12. Qian L., Peng J., Xiang Z., Pan Y., Lu W. Effect of annealing on magnetic properties of Fe/Fe₃O₄ soft magnetic composites prepared by in-situ oxidation and hydrogen reduction methods. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 778, pp. 712–720. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.184>
13. Hsiang H.-I., Fan L.-F., Hung J.-J. Phosphoric acid addition effect on the microstructure and magnetic properties of iron-based soft magnetic composites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 447, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.08.096>
14. Nakamura R., Matsubayashi G., Tsuchiya H., Fujimoto S., Nakajima H. Transition in the nanoporous structure of iron oxides during the oxidation of iron nanoparticles and nanowires. *Acta Materialia*, 2009, vol. 57, no. 14, pp. 4261–4266. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.05.023>
15. Taghvaei A. H., Shokrollahi H., Janghorban K. Properties of iron-based soft magnetic composite with iron phosphate-silane insulation coating. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 481, no. 1–2, pp. 681–686. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.03.074>

Information about the authors

Demidenko Olga F. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher. Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: orion_minsk@tut.by. ORCID: 0000-0002-6201-6281.

Zhaludkevich Aliaksandr L. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory. Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zheludkevich27@gmail.com. ORCID: 0000-0003-1900-0564.

Laryn Artsiom O. – Researcher. Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: new_a-larin@mail.ru.

Govor Gennady A. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Leading Researcher. Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: govor@physics.by.

Sun Haibo – D. Sc., Associate Professor. School of Materials Science and Hydrogen Energy, Foshan University (18 Jiangwan 1st Rd, Chancheng Qu, Foshan 528000, China), E-mail: sunmyseven@126.com.

Chen Dongchu – D. Sc., Dean. School of Materials Science and Hydrogen Energy, Foshan University (18 Jiangwan 1st Rd, Chancheng Qu, Foshan 528000, China), E-mail: Chendc@fosu.edu.cn.

Yankevich Stsiapan N. – Deputy Director General for Innovation. JSC “Instrument-Making Plant “Optron” (52, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nio@optron.by.

Информация об авторах

Демиденко Ольга Федоровна – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: orion_minsk@tut.by. ORCID: 0000-0002-6201-6281.

Желудкевич Александр Ларионович – канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zheludkevich27@gmail.com. ORCID: 0000-0003-1900-0564.

Ларин Артем Олегович – научный сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: new_a-larin@mail.ru.

Говор Геннадий Антонович – д-р физ.-мат. наук, профессор, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: govor@physics.by.

Сунь Хайбо – д-р наук, доцент. Школа материаловедения и водородной энергетики Фошаньского университета (18 Jiangwan 1st Rd, Chancheng Qu, Фошань 528000, Китай). E-mail: sunmyseven@126.com.

Чен Дунчу – доктор наук, декан. Школа материаловедения и водородной энергетики Фошаньского университета (18 Jiangwan 1st Rd, Chancheng Qu, Фошань 528000, Китай). E-mail: Chendc@fosu.edu.cn.

Янкевич Степан Николаевич – заместитель генерального директора. ОАО «Приборостроительный завод «Оptron» (ул. Ф. Скорины, 52, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nio@optron.by.

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

АГРАРНЫЕ НАУКИ
AGRARIAN SCIENCES

УДК 636.22/.28.033;636.22/.28.034
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-517-528>

Поступило в редакцию 20.03.2023
Received 20.03.2023

**Член-корреспондент П. П. Казакевич¹, член-корреспондент В. Н. Тимошенко²,
А. А. Музыка², С. А. Кирикович², Л. Н. Шейграцова², М. П. Пучка², Н. Н. Шматко²,
М. В. Тимошенко², А. И. Конёк²**

¹Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

²Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству,
Жодино, Республика Беларусь

**ОЦЕНКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
НА НАИБОЛЕЕ ТИПИЧНЫХ ФЕРМАХ И КОМПЛЕКСАХ
ПО ПРОИЗВОДСТВУ МОЛОКА**

Аннотация. Изложены результаты исследований по энергетической оценке наиболее распространенных вариантов сочетания объемно-планировочных и технологических решений зданий и сооружений, применяемого комплекта технологического оборудования на наиболее типичных фермах и комплексах по производству молока. Изучены наиболее значимые элементы технологии и технологическое оборудование, режимы его работы, энергопотребление по элементам затрат для процессов приготовления и раздачи кормов, удаления навоза и обеспечения требуемых параметров микроклимата, определяющие уровень интенсивности производственного процесса при различных вариантах планировки зданий и поголовья животных. Полученные результаты позволяют определить наиболее эффективные варианты механизации и автоматизации производственного процесса и усовершенствовать технологические приемы их выполнения.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, содержание, молочно-товарная ферма, биоэнергетический анализ

Для цитирования. Оценка производственных процессов на наиболее типичных фермах и комплексах по производству молока / П. П. Казакевич [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 6. – С. 517–528. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-517-528>

**Corresponding Member Peter P. Kazakevich¹, Corresponding Member Uladzimir N. Tsimoshanka²,
Andrei A. Muzyka², Svetlana A. Kirikovich², Lyudmila N. Sheigratsova², Marina P. Puchka²,
Natalia N. Shmatko², Marina V. Tsimoshanka², Alla I. Konek²**

¹Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding,
Zhodino, Republic of Belarus

**ASSESSING THE PRODUCTION PROCESSES ON THE MOST TYPICAL FARMS
AND MILK PRODUCTION COMPLEXES**

Abstract. The article presents the results of research, according to an energy assessment, of the most common options for combining spatial planning and technological solutions of buildings and structures, the set of technological equipment used on the most typical operating farms and milk production complexes. The most significant elements of technology and technological equipment, its operating modes, energy consumption by cost elements for the processes of preparation and distribution of feed, manure removal and provision of the required microclimate parameters, determining the intensity level of the production process in various variants of building layout and livestock, have been studied. The results obtained allow us to determine the most effective options for mechanization and automation of the production process and improve the technological methods of their implementation.

Keywords: cattle, maintenance, dairy farm, bioenergetic analysis

For citation. Kazakevich P. P., Tsimoshanka U. N., Muzyka A. A., Kirikovich S. A., Sheigratsova L. N., Puchka M. P., Shmatko N. N., Tsimoshanka M. V., Konek A. I. Assessing the production processes on the most typical farms and milk production complexes. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 6, pp. 517–528 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-517-528>

Введение. Опыт развитых стран мира показывает, что конкурентоспособность продукции и прежде всего продуктов питания обеспечивается интенсификацией производства за счет внедрения высоких технологий, принципиально новой техники, технологического перевооружения отрасли.

Животноводческая ферма представляет собой весьма сложную биотехническую систему, в которой животные выступают не только как средство переработки корма в конечную продукцию, но и как средство воспроизводства стада. В этой системе технологии содержания и обслуживания животных, машины и помещения, т. е. технологические, технические и объемно-планировочные решения, составляют единое целое.

В скотоводстве основными производственно-технологическими линиями, применительно к которым внедряются средства механизации, являются приготовление и раздача кормов, водоснабжение, поение, доение, очистка помещений от навоза, обеспечение микроклимата. Для механизации этих процессов разработаны специальные машины, механизмы и устройства [1].

Изыскание путей снижения энергоемкости и повышения энергоотдачи производства молока и говядины неразрывно связано с многовариантной технологией и применением различных технических средств их получения [2].

Изучение энергопотребления основных технологических процессов по элементам затрат на фермах и комплексах по производству молока позволит найти пути по снижению энергоемкости производства молока, повысить эффективность производства, его стабильность и конкурентоспособность.

Современные фермы и комплексы по производству молока и говядины представляют собой сложный инженерный комплекс, включающий технические элементы, обеспечивающие комфортное содержание, кормление, доение, поение и другие технологические операции, которые представляют собой локальные биотехнические подсистемы. Различия в физиологических потребностях животных на определенных фазах жизненного цикла к кормлению, условиям содержания, параметрам микроклимата обуславливают необходимость формирования технологических групп, позволяющих организовать их дифференцированное обслуживание. Для обеспечения поточного принципа производства в помещениях для животных предусматриваются специализированные технологические сектора с соответствующей планировкой и техническим оснащением. Их можно рассматривать как отдельные производственные модули, совокупность которых позволяет сформировать предприятие с полным технологическим циклом [3; 4].

Особая значимость повышения эффективности производства молока выражается в получении максимальной прибыли, повышении рентабельности и конкурентоспособности отрасли. Экономически эффективен такой способ производства, при котором производится максимальный объем продукции приемлемого качества с минимальными затратами и продажей данной продукции с наименьшими издержками [5].

Для развития животноводства необходимо совершенствовать не только натуральные показатели производства, но и экономические условия. Чтобы иметь накопления для добавочных вложений, отрасль должна иметь доходность, прибыльность. Последнее зависит не только от организационных факторов, но и от практики регулирования цен, которые зачастую не обеспечивают необходимую рентабельность, особенно в скотоводстве [6].

Одним из показателей, позволяющих более достоверно определять затраты на производство молока, является энергоемкость, включение которой в общую систему показателей способствует выработке как общей стратегии сбережения энергоресурсов, так и конкретных решений по применению энергосберегающих технологий и техники. При этом для определения энергоемкости производства молока в качестве методологической основы целесообразно использовать метод энергетического анализа, который позволяет проводить комплексную оценку по совокупным энергозатратам различных технологий производства молока и говядины [7].

Ресурсо-, энерго- и трудосберегающая технология производства молока, выращивания и откорма молодняка крупного рогатого скота основана на использовании средств механизации производственных процессов, в наибольшей степени соответствующих биологическим потребно-

стям организма животных, технологических приемов и методов, позволяющих полностью реализовать генетический потенциал продуктивности, на обеспечении оптимальных нормативов кормления, содержания, размещения животных [8].

Изучение средств механизации, режима их работы, расхода топлива и электроэнергии, мощности потребителей электроэнергии и их энергетической оценки на фермах и комплексах по производству молока и говядины, условий содержания, кормления и поения животных, затрат труда на обслуживание животных, позволит найти пути по снижению энергоемкости производства молока и говядины, повысить эффективность производства, его стабильность и конкурентоспособность.

Целью данной научной разработки являлась комплексная оценка технологических решений и применяемого комплекта технологического оборудования на наиболее типичных действующих в Республике Беларусь фермах и комплексах различной мощности по производству молока.

Материалы и методы исследований. Объектом исследования явились фермы и комплексы по производству молока ГП «ЖодиноАгроПлемЭлита» Смолевичского района: селекционно-племенная ферма (СПФ) «Будагово» (мощность фермы по проекту 268 голов), МТФ «Жажелка» (мощность фермы по проекту 750 голов), МТК «Березовица» (мощность комплекса по проекту 850 голов), МТК «Рассошное» (мощность комплекса по проекту 1000 голов) и МТК «Устенский» Оршанского района (мощность комплекса по проекту 1200 голов), расположенный в РПУП «Устье» НАН Беларуси Оршанского района.

Были изучены следующие показатели:

зоотехнические: мощность и среднегодовое поголовье фермы (комплекса), среднесуточный и валовый прирост, среднесуточный удой, валовый надой, условия содержания животных;

технологические: технологические решения, технологическое оборудование;

технико-экономические: виды применяемых машин и оборудования, режим их работы, расход топлива и электроэнергии, мощности потребителей электроэнергии; прямые затраты, инвестиционные затраты, затраты труда на обслуживание животных;

энергетические: фактическая энергоемкость процессов жизнеобеспечения и обслуживания животных по удельному расходу топливно-энергетических ресурсов в условном топливе кг/гол. с учетом прямых, косвенных и совокупных затрат энергии.

В ходе проведения исследований был осуществлен сбор эмпирических, производственных и статистических материалов, изучены альбомы проектной документации наиболее распространенных животноводческих объектов. Для оценки энергопотребления были использованы [7–12]. В качестве измерителя энергоемкости были приняты затраты энергии (Дж) с переводом в условное топливо (у. т.) на голову скота по элементам затрат в производственных процессах.

Результаты и их обсуждение. Одним из критериев, позволяющих достоверно определить затраты на производство тонны молока, является энергоемкость. Это затраты материально-энергетических ресурсов на единицу производимой продукции. Определение этого показателя позволяет выявить энергосберегающие направления при совершенствовании и разработке новых технологических решений. Этот показатель наиболее объективен, не зависит от конъюнктуры рынка и характеризует собой технический уровень развития технологии [13].

Энергетическая оценка технологии производства молока производится по показателям, характеризующим оцениваемые объекты, технологии, технологические процессы и количество произведенной продукции. К таким показателям относятся: совокупный годовой расход энергии в процессе производства продукции, технологическая энергоемкость, выход энергии, энергетический коэффициент эффективности технологии, который оценивается по энергетическому выходу конечного продукта.

Основными потребителями прямой энергии на фермах и комплексах по производству молока и говядины являлись системы, обеспечивающие оптимальную среду обитания животных, и технологические процессы, связанные с содержанием, кормлением и доением животных (системы водоснабжения, освещения, доения). Прямые затраты энергии включали в себя также расход топлива и горюче-смазочных материалов технологическим оборудованием и машинами, применяемыми на животноводческих объектах.

Косвенные затраты энергии определялись затратами кормов, воды, подстилочных материалов, дезинфицирующих средств, минеральных добавок, ветеринарных препаратов и др.

Инвестиционные затраты энергии состояли из энергозатрат на добычу, переработку и доставку топлива, на строительство зданий и сооружений, на производство машин и оборудования, а также из энергозатрат на выращивание продуктивного скота. Энергоносителями для технологических процессов на изучаемых объектах служили электроэнергия, дизельное топливо и бензин.

Затраты энергии живого труда складывались из энергозатрат по всем категориям работников фермы (комплекса).

Для анализа энергозатрат при производстве молока в качестве объекта исследования были взяты молочно-товарные фермы и комплексы, имеющие полный цикл производства молока за 2020 г. (МТФ «Жажелка», МТК «Березовица» и МТК «Рассошное»).

Анализ энергоемкости производства молока на изучаемых объектах свидетельствует о том, что суммарные энергозатраты зависят от затрат энергии на отдельные технологические операции. На рис. 1 представлена сравнительная оценка удельного веса статей затрат энергии на изучаемых объектах.

Из анализа диаграммы (рис. 1) следует, что основными расходными статьями при производстве молока на МТФ «Жажелка», МТК «Березовица» и МТК «Рассошное» являлись затраты на корма (40,6–42,2 %) и на выращивание продуктивного скота (39,7–41,0 %), на долю которых приходился наибольший процент. Далее в структуре затрат на изучаемых объектах следовали затраты на подстилку (4,5–6,8 %), затраты живого труда (2,7–4,1 %), затраты на металлоемкость машин и оборудования (1,9–3,4 %) и затраты, овеществленные в энергоносителях (2,6–3,1 %). Затраты, овеществленные в зданиях и сооружениях, на МТФ «Жажелка», МТК «Березовица» и МТК «Рассошное» составили соответственно: 1,37, 1,4 и 1,9 %, а затраты на жидкое топливо – 1,65, 0,96 и 1,1 % соответственно. Меньше одного процента в структуре энергозатрат занимали затраты на электроэнергию и вспомогательное сырье (лекарственные, ветеринарные и дезинфицирующие средства).

Результаты выполненного нами энергоанализа производства молока (табл. 1) показали, что самые низкие суммарные энергозатраты за 2020 г. оказались на МТФ «Жажелка» – 2422507 кг у. т., а самые высокие – на МТК «Рассошное» – 5186166 кг у. т.

Из расчета на одно животное и на 1 т молока (рис. 2) наименее энергоемкой явилась технология производства молока, осуществляемая на комплексе «Березовица» (5832,4 и 733,8 кг у. т.), наиболее энергоемкой – на МТК «Рассошное» (6030,4 и 815,2 кг у. т. соответственно).

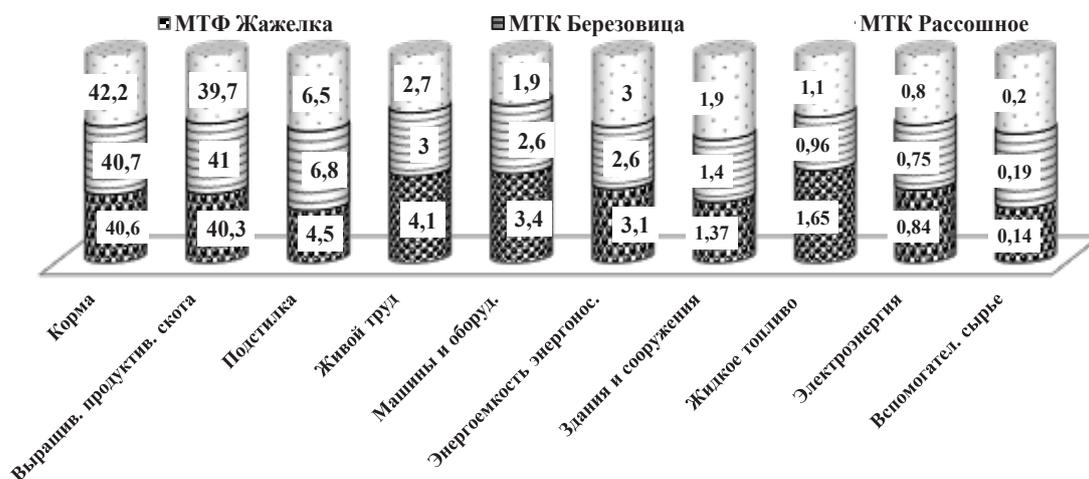


Рис. 1. Сравнительная оценка удельного веса основных статей энергозатрат на производство молока на изучаемых объектах, %

Fig. 1. Structure of energy consumption for milk production at the studied objects, %

Таблица 1. Показатели затрат энергии при производстве молока на изучаемых объектах
Table 1. Indicators of energy consumption in milk production at the studied facilities

Показатель Index	Единица измерения Unit	Объект Object		
		Жажелка	Березовица	Рассошное
I. Прямые затраты, кг у. т.				
Затраты электроэнергии	1 голова	49,0	41,7	50,3
	1 т молока	6,5	5,3	6,8
Затраты жидкого топлива	1 голова	97,5	53,5	67,6
	1 т молока	12,9	6,7	9,1
II. Косвенные затраты, кг у. т.				
Затраты энергии на корма	1 голова	2410,6	2374,7	2542,9
	1 т молока	318,5	298,8	343,7
Затраты энергии на подстилку	1 голова	265,1	397,2	388,8
	1 т молока	35,0	50,0	52,6
Затраты энергии на лекарства и дезинфицирующие средства	1 голова	7,7	10,7	12,9
	1 т молока	1,0	1,4	1,8
III. Инвестиционные затраты, кг у. т.				
Затраты энергии, овлещественные в энергоносителях	1 голова	186,3	151,5	183,7
	1 т молока	24,6	19,1	24,8
Затраты энергии, овлещественные в машинах и оборудовании	1 голова	202,9	154,0	115,4
	1 т молока	26,8	19,4	15,6
Затраты энергии, овлещественные в зданиях и сооружениях	1 голова	80,6	80,5	114,9
	1 т молока	10,7	10,1	15,5
Затраты энергии на выращивание продуктивного скота	1 голова	2393,3	2393,3	2393,3
	1 т молока	316,2	301,1	323,5
IV. Затраты энергии живого труда, кг у. т.				
Затраты энергии живого труда	1 голова	244,2	175,4	160,6
	1 т молока	32,3	22,1	21,7
Полные энергозатраты, кг у. т.				
Суммарные энергозатраты	–	2422507	3645277	5186166
	1 голова	5937,5	5832,4	6030,4
	1 т молока	784,4	733,8	815,2

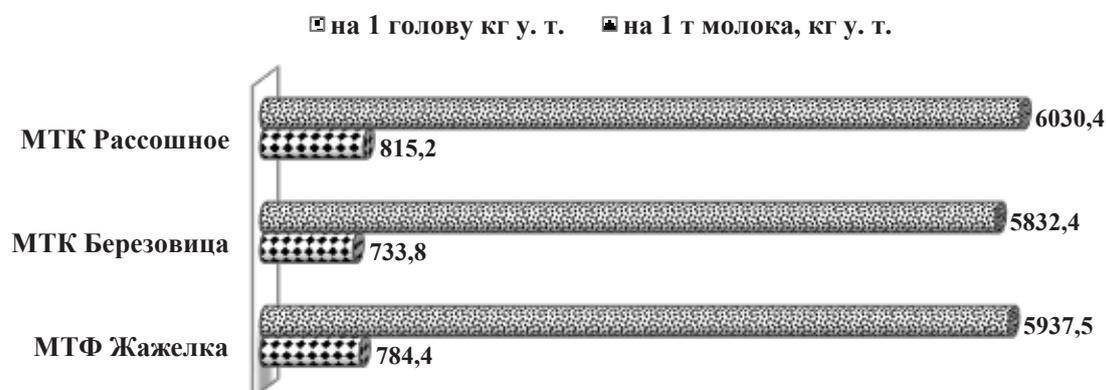


Рис. 2. Энергоемкость производства молока, кг у. т.

Fig. 2. Energy intensity of milk production, kg of cu. t.

Уровень энергозатрат на единицу продукции зависит не только от расхода ресурсов в расчете на каждое животное, но и от его продуктивности, так как с изменением среднесуточного удоя изменяются и статьи затрат на кормление и содержание животных. Так, наименьшее количество энергетических ресурсов на производство 1 т молока на МТК «Березовица» (733,8 кг у. т.) сочеталось с высокой продуктивностью животных (средний удой молока на 1 корову за 2020 г. здесь составил 7948 л, на МТФ «Жажелка» – 7569 л и на МТК «Рассошное» – 7397 л) и более высоким уровнем производства молока на одного работающего (225,8 л на комплексе «Березовица», 118,8 л и 219,4 л в расчете на одного работающего человека соответственно на ферме «Жажелка» и комплексе «Рассошное»).

Как было сказано выше, для ферм и комплексов разной мощности наибольший процент в структуре затрат занимали затраты на воспроизводство стада и затраты на корма. Так, затраты на выращивание продуктивного скота в расчете на 1 т молока на МТК «Рассошное» были на 2,3–7,4 % выше, чем на МТФ «Жажелка» и на МТК «Березовица» соответственно. Однако в расчете на 1 голову они были одинаковыми, так как коэффициент воспроизводства стада на данных фермах имел одинаковое значение.

Самые низкие затраты на корма в расчете на 1 голову скота оказались на МТК «Березовица», что на 35,9–168,3 кг у. т. ниже по сравнению с рационом на ферме «Жажелка» и МТК «Рассошное» соответственно. Косвенные затраты энергии на подстилку на изучаемых объектах составили 265,1–397,2 кг у. т. в расчете на 1 голову скота. На МТК «Березовица» они оказались в 0,98–1,5 раза выше по сравнению с показателями затрат энергии на подстилку на МТК «Рассошное» и на ферме «Жажелка» соответственно. Для снижения затрат на подстилку целесообразно применять технологическое зонирование зданий (разделять площадь секций на зону кормления и отдыха).

В годовых совокупных энергозатратах самые высокие затраты энергии живого труда в расчете на голову и на тонну молока оказались на МТФ «Жажелка», что в 1,4–1,5 раза выше, чем на МТК «Березовица» и МТК «Рассошное», что связано с большим количеством производственного (6 операторов машинного доения, 8 животноводов) и обслуживающего персонала на ферме (5 человек) при имеющемся поголовье скота. Основной удельный вес энергии ручного труда на изучаемых объектах приходился на животноводов (30,0–31,8 %), операторов машинного доения (22,7–23,0 %) и трактористов (7,7–9,0 %).

Затраты энергии, овеществленные в машинах и оборудовании, на ферме «Жажелка» также оказались на 48,9–87,5 кг у. т., или в 1,3–1,8 раза выше в расчете на 1 голову, чем на МТК «Березовица» и МТК «Рассошное» соответственно, что связано с наличием энергоемкого оборудования и машин на данной ферме при имеющемся в обслуживании поголовье коров. Наибольший удельный вес энергии машин и оборудования на обследуемых фермах и комплексах приходился на кормораздатчики и погрузчики кормов и навоза – 59,0–60,0 %, на тракторы – 33,7–50,8 %, доильное оборудование – 22,0–32,7 % и оборудование для охлаждения и хранения молока – 7,8–11,9 %. Для снижения затрат энергии в целом по этой статье необходимо применять оптимальный комплект машин, устранять их дублирование благодаря повышению надежности, строить рациональные графики и режимы работы, а также маршруты движения при эксплуатации машин, в частности на ферме «Жажелка» необходимо увеличить поголовье скота до 750 в соответствии с проектной вместимостью фермы (комплектование фермы за 2020 г. составило всего 62 %).

В годовых совокупных энергозатратах большая доля затрат приходилась и на затраты по доставке энергоносителей потребителю. Самые низкие затраты по этому показателю оказались на МТК «Березовица» – 151,5 кг у. т. в расчете на 1 голову скота. На МТФ «Жажелка» и на МТК «Рассошное» затраты составили 186,3 и 183,7 кг у. т. соответственно. Данные об эксплуатации зданий и сооружений свидетельствуют о том, что энергетические затраты были выше на ферме большей мощности, т. е. на комплексе «Рассошное» – 114,9 кг у. т. в расчете на 1 голову скота.

В совокупных энергозатратах наибольший удельный вес приходился на энергию, овеществленную в топливе, и расходующую тракторами и погрузчиками при раздаче кормов и уборке навоза. При этом в расчете на 1 голову скота затраты жидкого топлива на ферме «Жажелка» оказались на 29,9–44,0 кг у. т., или в 1,4–1,8 раза выше, чем на МТК «Рассошное» и МТК «Бере-

зовица» соответственно. Большой расход топлива на этой ферме, возможно, связан с технологической операцией уборки навоза, которая осуществляется во всех зданиях фермы трактором с бульдозерной навеской. Важным направлением уменьшения энергоемкости топлива является устранение лишних и сокращение холостых пробегов тракторов на транспортных работах, оптимальная загрузка прицепов; рациональное размещение животноводческих предприятий и объектов кормопроизводства; исключение перевалок кормов на пути от хранилища к животноводческим зданиям и перегрузок продукции на пути к местам переработки и реализации, наличие кормового двора с хранилищами для сена, соломы и сенажа; размещение отдельных хранилищ, навесов для хранения сена (соломы) в ближайшей доступности для потребителя. Для каждого животноводческого объекта должны быть определены необходимые нормы запаса кормов и подстилки.

Изучение и анализ затрат электроэнергии в условиях ферм и комплексов по производству молока показали, что реализация новых технологических решений позволила уменьшить расход энергии. Так, замена большей части люминесцентных светильников на МТК «Березовица» светодиодными привела к снижению затрат на освещение. По затратам электроэнергии в расчете на голову скота было отмечено, что на МТК «Березовица» они были ниже, чем на ферме «Жажелка» и комплексе «Рассошное» (41,7 кг у. т. в расчете на голову против 49 и 50,3 кг у. т. соответственно). Кроме того, более низкие показатели затрат энергии на МТК «Березовица» можно объяснить наличием доильного оборудования с меньшей потребляемой мощностью (на МТК «Березовица» доильная установка «Параллель» 2x16 мощностью 30,0 кВт, на МТФ «Жажелка» доильная установка «Елочка» 2x14 мощностью 35,5 кВт, на МТК «Рассошное» доильная установка «Карусель-40» мощностью 50,0 кВт).

Энергетические затраты на лекарственные, ветеринарные и дезинфицирующие средства на изучаемых объектах были наименьшими. Так, на одно животное годовые затраты на вспомогательные средства, переведенные в условное топливо, составили 7,7 кг на МТФ «Жажелка», 10,7 кг на МТК «Березовица» и 12,9 кг на МТК «Рассошное».

Расчеты показателей биоэнергетической оценки производства молока на изучаемых объектах показали (рис. 3), что коэффициент биоэнергетической эффективности всей продукции, включая основную продукцию – молоко, дополнительную – телят от рождения (приплод) до 1,5 месяца (прирост), мясо выбракованных животных и побочную – навоз (экскременты с подстилкой), составил: на МТФ «Жажелка» – 50,4 %, на МТК «Березовица» – 58,6 %, на МТК «Рассошное» – 55,3 %; коэффициент биоэнергетической эффективности основной и дополнительной продукции (без экскрементов и подстилки) – 14,5, 15,5 и 14,0 % соответственно по фермам.

Анализ диаграммы (рис. 3) показал, что коэффициент биоэнергетической эффективности всей продукции на МТК «Березовица» был на 3,3–8,2 % выше, основной и дополнительной про-

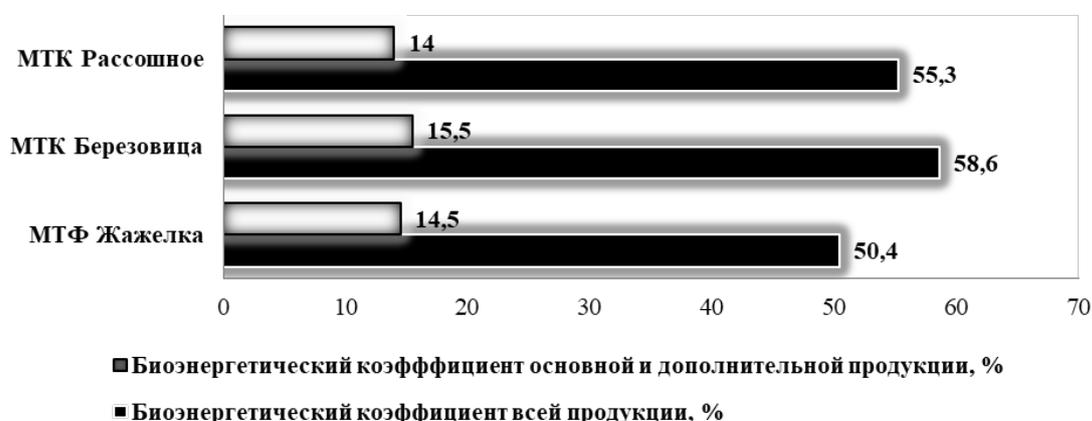


Рис. 3. Биоэнергетические показатели производства молока на изучаемых фермах, %

Fig. 3. Bioenergetic indicators of milk production on the studied farms, %

дукции – на 1–1,5 % выше, чем на МТК «Рассошное» и на МТФ «Жажелка». Согласно расчетам, на ферме «Жажелка» необходимо изыскивать пути повышения коэффициента биоэнергетической эффективности производства молока, прежде всего за счет снижения полных энергозатрат при его производстве.

Нами было изучено энергопотребление по элементам затрат за 2021 г. для процесса приготовления и раздачи кормов мобильным способом на пяти молочных фермах и комплексах. На рис. 4 представлена структура энергозатрат при выполнении процесса приготовления и раздачи кормов на изучаемых объектах.

Установлено, что основной удельный вес при приготовлении и раздаче кормов на изучаемых объектах приходился на затраты, овлеществленные в машинах и оборудовании (22,6–50,4 %), затраты на жидкое топливо (15,2–40,4 %) и затраты, овлеществленные в энергоносителях (12,1–15,7 %). Далее в структуре затрат следовали затраты, овлеществленные в зданиях и сооружениях (9,7–16,2 %), затраты живого труда (3,8–6,9 %) и затраты на электроэнергию (1,5–2,6 %).

Результаты выполненного энергоанализа технологического процесса приготовления и раздачи кормов (табл. 2) показали, что в расчете на одно животное наименее энергоемким явился процесс приготовления и раздачи кормов, осуществляемый на комплексе «Рассошное» (122,99 кг у. т/гол.), наиболее энергоемким – на СПФ «Будагово» (231,17 кг у. т/гол.).

Из данных табл. 2 видно, что удельный вес энергии, овлеществленной в машинах и оборудовании, в энергозатратах на приготовление и раздачу кормов, довольно значителен. Наибольшие затраты в расчете на 1 голову отмечены на СПФ «Будагово» (116,42 кг у. т.) и МТФ «Жажелка» (59,94 кг у. т.) при имеющемся в обслуживании поголовье коров. Наибольший удельный вес приходился на энергию, овлеществленную в топливе, и расходуемую тракторами и погрузчиками при раздаче кормов. Затраты по этому показателю колебались от 30,57 до 49,71 кг у. т. на голову. Большая доля затрат приходилась и на затраты по доставке энергоносителей потребителю (от 15,12 до 28,33 кг у. т/гол.). Самые высокие затраты энергии живого труда в расчете на голову оказались на СПФ «Будагово», что в 1,8–3,4 раза выше, чем на других фермах.

Расчеты показали (табл. 2, рис. 5), что затраты энергии на заготовку, хранение, приготовление и раздачу кормов на изучаемых объектах варьировали от 2461,02 до 3252,93 кг у. т. на 1 голову, или от 42,7 до 46,2 % от общих энергозатрат на производство молока. При этом на заготовку и хранение кормов приходилось 2335,53–3021,76 кг у. т/гол., или 40,5–43,7 % от общих затрат

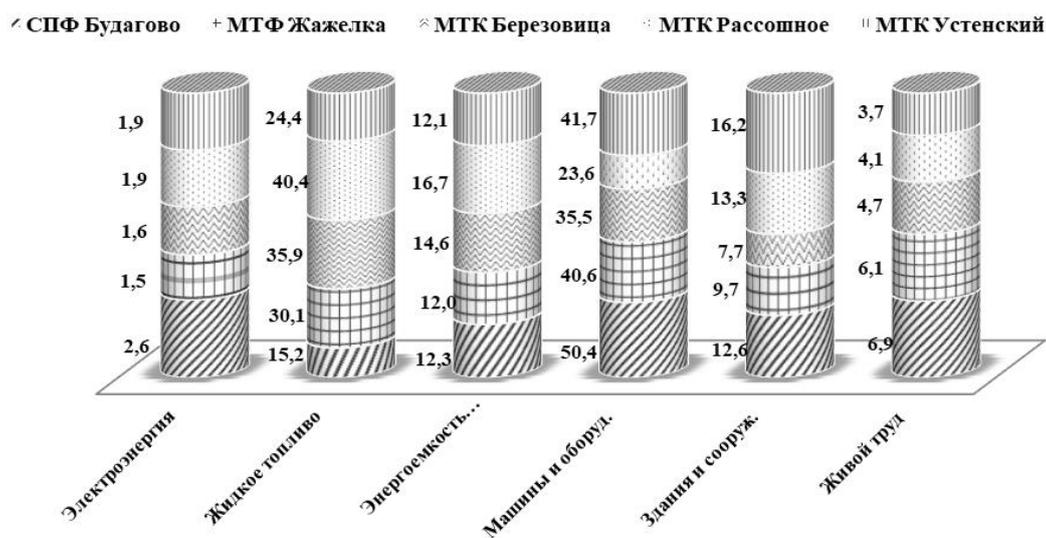


Рис. 4. Структура энергозатрат при выполнении процесса приготовления и раздачи кормов на изучаемых объектах, %

Fig. 4. The structure of energy consumption during the process of preparation and distribution of feed at the studied objects, %

энергии на производство молока, а на приготовление и раздачу кормов – 122,99–231,17 кг у. т/гол., или 1,8–3,3 %.

Таким образом, энергоанализ работы молочных ферм и комплексов показал, что величина энергозатрат на раздачу кормов зависит от мощности фермы (комплекса). Установлено, что с увеличением поголовья КРС затраты энергии в расчете на голову, связанные с раздачей кормов, уменьшаются (табл. 2). Так, наибольшие энергозатраты на приготовление и раздачу кормов в расчете на голову были установлены на СПФ «Будагово» (231,17 кг у. т.). С увеличением мощности комплекса (с ростом обслуживаемого поголовья) отмечено снижение данного показателя. На ферме «Жажелка» они составили 147,59 кг у. т/гол., на комплексе «Березовица» – 127,60 кг у. т/гол., на комплексе «Устенский» – 125,49 кг у. т/гол. и на комплексе «Рассошное» – 122,99 кг у. т/гол.

Таблица 2. Совокупные и поэлементные затраты энергии на приготовление и раздачу кормов для молочных ферм и комплексов в расчете на 1 голову, кг у. т/гол.

Table 2. Total and piecemeal energy costs for the preparation and distribution of feed for dairy farms and complexes per 1 head, kg of cu. t/head

Показатель Index	Объект Object				
	Будагово	Жажелка	Березовица	Рассошное	Устенский
Среднее поголовье, гол.	219	380	591	800	738
Затраты электроэнергии	6,02	2,21	2,06	2,30	2,39
Затраты жидкого топлива	35,24	44,40	44,58	49,71	30,57
Затраты энергии, овеществленные в энергоносителях	28,33	17,78	17,30	19,32	15,12
Затраты энергии, овеществленные в машинах и оборудовании	116,42	59,94	45,28	27,75	52,32
Затраты энергии, овеществленные в зданиях и сооружениях	29,23	14,48	12,41	18,75	20,36
Затраты энергии живого труда	15,93	8,78	5,97	5,15	4,74
Суммарные энергозатраты на приготовление и раздачу кормов	231,17	147,59	127,60	122,99	125,49
Суммарные энергозатраты на заготовку и хранение кормов	3021,76	2622,38	2929,16	2948,99	2335,53
Суммарные энергозатраты на производство молока	7045,98	6481,51	6699,81	6889,49	5498,80

Уборка навоза в зданиях коровников для дойного стада (беспривязное боксовое содержание с использованием измельченной соломенной подстилки) на СПФ «Будагово», МТК «Рассошное», МТК «Березовица» и МТК «Устенский» осуществляется скреперной системой, а на МТФ «Жажелка» – бульдозером.

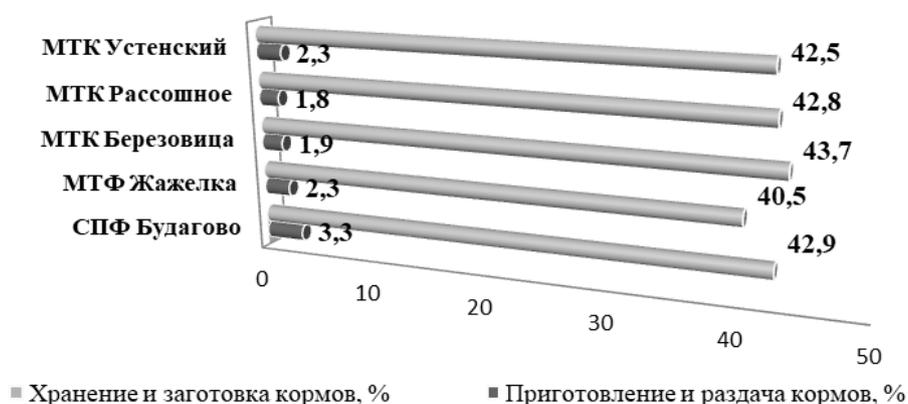


Рис. 5. Удельный вес отдельных статей энергозатрат на заготовку, хранение, приготовление и раздачу кормов на изучаемых объектах, %

Fig. 5. The structure of energy consumption for harvesting, storage, preparation and distribution of feed at the studied facilities, %

Результаты выполненного энергоанализа технологического процесса удаления навоза (табл. 3) показали, что в расчете на одно животное наиболее энергоемким стал процесс навозоудаления, осуществляемый бульдозером на МТФ «Жажелка» (103,44 кг у. т.), наименее энергоемким, осуществляемый скреперными установками на комплексе «Березовица» (23,30 кг у. т.).

Т а б л и ц а 3. Совокупные и поэлементные затраты энергии на выполнение процесса удаления навоза на молочных фермах и комплексах

Table 3. Total and piecemeal energy costs for the manure removal process on dairy farms and complexes

Объект (поголовье) Object (livestock)	Прямые энергозатраты				Овеществленные энергозатраты						Затраты энергии живого труда		Суммарные энергозатраты	
	электро-энергии		топлива		энергоноси-тели		машины и оборудование		здания и сооружения					
	кг у. т/гол.	%	кг у. т/гол.	%	кг у. т/гол.	%	кг у. т/гол.	%	кг у. т/гол.	%	кг у. т/гол.	%	кг у. т/гол.	%
Будагово (219)	3,01	6,5	–	–	10,04	21,8	18,41	40,0	6,64	14,4	7,97	17,3	46,07	100
Жажелка (380)	–	–	49,33	47,7	11,55	11,2	31,70	30,6	2,08	2,0	8,78	8,5	103,44	100
Березовица (591)	2,06	8,8	–	–	6,86	29,4	7,70	33,0	3,71	15,9	2,99	12,8	23,30	100
Рассошное (800)	2,30	9,4	–	–	7,68	31,2	6,50	26,4	5,54	22,5	2,57	10,5	24,59	100
Устенский (738)	2,39	8,7	–	–	7,96	29,0	7,17	26,1	7,53	27,5	2,37	8,7	27,42	100

В расчете на одну голову скота затраты энергии при уборке навоза бульдозером оказались в 2,2–4,4 раза, или на 55,5–77,5 % выше, чем при уборке навоза скреперами. Установлено, что основной удельный вес при выполнении процесса навозоудаления мобильными средствами (МТФ «Жажелка») приходился на затраты жидкого топлива (47,7 %) и на затраты, овеществленные в машинах и оборудовании (30,6 %); при уборке стационарными средствами – на затраты, овеществленные в энергоносителях (29,0–31,2 %), затраты, овеществленные в машинах и оборудовании (26,1–40,0 %), и на затраты, овеществленные в зданиях и сооружениях (14,4–27,5 %).

Анализ табл. 3 свидетельствует, что полные годовые затраты жидкого топлива на ферме «Жажелка» в расчете на 1 голову скота составили 49,33 кг у. т. Удельный вес энергии, овеществленной в машинах и оборудовании, в энергозатратах на удаление навоза мобильным способом, довольно значителен, что связано с использованием высокопроизводительного (25 т/ч) энергоемкого трактора по сравнению с малоэнергоемкими (производительность – 0,5–6,4 т/ч) скреперными установками. В расчете на одну голову скота материалоемкость мобильных средств навозоудаления в 1,7–4,9 раз, или на 41,9–79,5 % превышала стационарные.

По затратам энергии живого труда более высокоэнергоемкой также оказалась мобильная уборка навоза. Так, энергоемкость прямых затрат труда водителя бульдозера на МТФ «Жажелка» оказалась в 1,1–3,7 раз, или на 9,2–73,0 % выше, чем слесарей, работающих на скреперах, что в пересчете на 1 голову скота составило 8,78 кг у. т. против 2,37, 2,57, 2,99 и 7,97 кг у. т/гол. на комплексах «Устенский», «Рассошное», «Березовица» и на СПФ «Будагово» соответственно.

Анализ суммарных затрат энергии на голову скота показал, что при уборке навоза скреперами полные энергозатраты составили 23,30–46,07 кг у. т/гол. Высокие энергозатраты на уборку навоза на СПФ «Будагово» (в 1,4–2,0 раза выше по сравнению с затратами на комплексах «Березовица», «Рассошное», «Устенский») можно объяснить небольшим поголовьем скота на ферме и неполной ее комплектацией. Для транспортирования навоза из прифермерских навозохранилищ (навозосборников) в полевые навозохранилища или на поля применяются высокопроизводительные энергоемкие машины (погрузчик Амкодор 352, трактор МТЗ-3522, МЖУ-20, прицеп ПМФ-20, МВЖУ-12, трактор МТЗ-2022), что ведет к увеличению энергозатрат на средства механизации и затрат жидкого топлива. Исследования технологического процесса мобильных средств показали, что 30–50 % рабочего времени затрачивается на основную работу, а остальное расходуется на погрузочно-разгрузочные операции, движение порожних агрегатов, в результате чего складывается высокая себестоимость перевозок.

Энергоанализ работы пяти молочных ферм и комплексов показал, что технология удаления навоза из животноводческих помещений стационарными средствами с применением скреперных

установок циклического действия и насосного оборудования эффективнее бульдозерного навозоудаления, имеет более низкие энергозатраты и материалоемкость, не требует использования жидкого топлива, позволяет полностью автоматизировать процесс навозоудаления и выполнять его в соответствии с требованиями по защите окружающей среды.

Заключение. Обобщая вышесказанное, можно отметить, что эффективность технологии производства молока зависит от сочетаемости системы содержания животных, типов помещений и средств механизации всех производственных процессов. Выбор способов, средств механизации и технологического оборудования зависит от строительных решений животноводческих зданий, которые связаны с технологическими решениями систем транспортировки и раздачи кормов, водопоеания, доения, удаления навоза, от технологий содержания и обслуживания животных, а также от взаимного расположения зданий и сооружений.

Список использованных источников

1. Модернизация, реконструкция и строительство молочных ферм и комплексов / Н. А. Попков [и др.]. – Горки, 2011. – 132 с.
2. Яковчик, Н. С. Экономические основы энергосбережения в животноводстве (теория, методология, практика) / Н. С. Яковчик, В. В. Валуев. – Барановичи, 1999. – 162 с.
3. Хазанов, Е. Е. Технологические модули для коров и молодняка при беспривязно-боксовом способе их содержания / Е. Е. Хазанов, В. В. Гордеев // Научно-технический прогресс в животноводстве – перспективные ресурсосберегающие машинные технологии: сб. науч. тр. – Подольск, 2005. – Т. 15, ч. 2. – С. 40–47.
4. Казакевич, П. П. Технологическая концепция «умной» молочной фермы / П. П. Казакевич, В. Н. Тимошенко, А. А. Музыка. – Жодино, 2022. – 252 с.
5. Башмакова, А. А. Развитие расширенного воспроизводства в сельском хозяйстве (на материалах Смоленской области): автореф. дис. ... канд. эконом. наук / А. А. Башмакова. – М., 2011. – 26 с.
6. Касьянова, А. С. Обоснование направлений расширенного воспроизводства в отраслях растениеводства: автореф. дис. ... канд. эконом. наук / А. С. Касьянова. – Курск, 2008. – 19 с.
7. Яковчик, Н. С. Энергоресурсосбережение в сельском хозяйстве / Н. С. Яковчик, А. М. Лапотко. – Барановичи, 1999. – 380 с.
8. Севернев, М. М. Энергосберегающие технологии в сельскохозяйственном производстве / М. М. Севернев. – М., 1992. – 190 с.
9. Кива, А. А. Биоэнергетическая оценка и снижение энергоемкости технологических процессов в животноводстве / А. А. Кива, В. М. Рабштына, В. И. Сотников. – М., 1990. – 176 с.
10. Севернев, М. М. Временная методика энергетического анализа в сельскохозяйственном производстве / М. М. Севернев. – Минск, 1991. – 126 с.
11. Методика энергетического анализа технологических процессов в сельскохозяйственном производстве. – М., 1995. – 95 с.
12. Мишууров, Н. П. Биоэнергетическая оценка и основные направления снижения энергоемкости производства молока / Н. П. Мишууров. – М., 2010. – 152 с.
13. Миндрин, А. С. Энергоэкономическая оценка сельскохозяйственной продукции / А. С. Миндрин. – М., 1987. – 187 с.

References

1. Popkov N. A., Kurdeko A. P., Timoshenko V. N., Trofimov A. F., Shalak M. V., Muzyka A. A., Kurak A. S. [et al.]. *Modernization, reconstruction and construction of dairy farms and complexes*. Gorki, 2011. 132 p. (in Russian).
2. Yakovchik N. S., Valuev V. V. *Economic foundations of energy conservation in animal husbandry (theory, methodology, practice)*. Baranovichi, 1999. 162 p. (in Russian).
3. Khazanov E. E., Gordeev V. V. Technological modules for cows and young animals with a loose-box method of their maintenance. *Nauchno-tekhnicheskii progress v zhivotnovodstve – perspektivnye resursosberegayushchie mashinnye tekhnologii: sbornik nauchnykh trudov* [Scientific and technological progress in animal husbandry – promising resource-saving machine technologies: collection of scientific papers]. Podolsk, 2005, vol. 15, part 2, pp. 40–47 (in Russian).
4. Kazakevich P. P., Timoshenko V. N., Muzyka A. A. *Technological concept of a “smart” dairy farm*. Zhodino, 2022. 252 p. (in Russian).
5. Bashmakova A. A. *Development of expanded reproduction in agriculture (on the materials of the Smolensk region)*. Moscow, 2011. 26 p. (in Russian).
6. Kasyanova A. S. *Substantiation of the directions of expanded reproduction in the branches of crop production*. Kursk, 2008. 19 p. (in Russian).
7. Yakovchik N. S., Lapotka A. M. *Energy resource conservation in agriculture*. Baranovichi, 1999. 380 p. (in Russian).
8. Severnev M. M. *Energy-saving technologies in agricultural production*. Moscow, 1992. 190 p. (in Russian).

9. Kiva A. A., Rabshtyna V. M., Sotnikov V. I. *Bioenergetic assessment and reduction of energy capacity of technological processes in animal husbandry*. Moscow, 1990. 176 p. (in Russian).
10. Severnev M. M. *Temporary method of energy analysis in agricultural production*. Minsk, 1991. 126 p. (in Russian).
11. *Methods of energy analysis of technological processes in agricultural production*. Moscow, 1995. 95 p. (in Russian).
12. Mishurov N. P. *Bioenergetic assessment and the main directions of reducing the energy intensity of milk production*. Moscow, 2010. 152 p. (in Russian).
13. Mindrin A. S. *Energy economic assessment of agricultural products*. Moscow, 1987. 187 p. (in Russian).

Информация об авторах

Казакевич Пётр Петрович – член-корреспондент, д-р техн. наук, профессор, заместитель председателя Президиума. Национальная академия наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nasb@presidium.bas-net.by.

Тимошенко Владимир Николаевич – член-корреспондент, д-р с.-х. наук, профессор, первый заместитель генерального директора. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

Музыка Андрей Анатольевич – канд. с.-х. наук, доцент, заведующий лабораторией. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

Кирикович Светлана Алексеевна – канд. с.-х. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

Шейграцова Людмила Николаевна – канд. с.-х. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

Пучка Марина Петровна – канд. с.-х. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

Шматко Наталья Николаевна – канд. с.-х. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

Тимошенко Марина Владимировна – канд. экон. наук, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

Конёк Алла Ивановна – науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222163, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

Information about the authors

Kazakevich Peter P. – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy Chairman of the Presidium. National Academy of Sciences (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nasb@presidium.bas-net.by.

Tsimoshanka Uladzimir N. – Corresponding Member, D. Sc. (Agrarian), Professor, First Deputy Director General. Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.

Muzyka Andrei A. – Ph. D. (Agrarian), Associate Professor, Head of the Laboratory. Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.

Kirikovich Svetlana A. – Ph. D. (Agrarian), Associate Professor, Leading Researcher. Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.

Sheigratsova Lyudmila N. – Ph. D. (Agrarian), Associate Professor, Leading Researcher. Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.

Puchka Marina P. – Ph. D. (Agrarian), Associate Professor, Leading Researcher. Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.

Shmatko Natalia N. – Ph. D. (Agrarian), Associate Professor, Leading Researcher. Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.

Timoshenko Marina V. – Ph. D. (Economy), Leading Researcher. Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.

Konek Alla I. – Researcher. Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Breeding (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.