

# ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

---

МИНСК. БЕЛОРУССКАЯ НАУКА. 2020. ТОМ 64. № 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, Минск, Беларусь

Редакционная коллегия

**С. А. Чижик**

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

**С. Я. Килин**

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

**А. В. Кильчевский**

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

**Т. П. Петрович**

(ведущий редактор журнала)

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

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

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

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

**С. В. Губкин** – Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**А. Е. Дайнеко** – Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

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

**А. И. Иванец** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

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

**Н. С. Казак** – научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,  
Минск, Беларусь

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

**Г. П. Коршунов** – Институт социологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**Н. П. Крутько** – Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

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

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

**О. Н. Левко** – Институт истории Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**С. В. Лемешевский** – Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**В. Ф. Логинов** – Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**А. А. Махнач** – Институт геологии, Минск, Беларусь  
**А. А. Михалевич** – Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**М. Е. Никифоров** – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам, Минск, Беларусь  
**В. А. Орлович** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**О. Г. Пенязьков** – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**Ю. М. Плескачевский** – Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь  
**Н. С. Сердюченко** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**А. Ф. Смянович** – Республиканский научно-практический центр неврологии и нейрохирургии, Минск, Беларусь  
**Л. М. Томильчик** – Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**А. В. Тузиков** – Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**С. А. Усанов** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**Л. В. Хотылева** – Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**И. П. Шейко** – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству, Жодино, Беларусь

Р е д а к ц и о н н ы й с о в е т

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

*Адрес редакции:*

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

---

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ. 2020. Т. 64. № 6

*Выходит на русском, белорусском и английском языках*

---

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

Сдано в набор 04.12.2020. Выпуск в свет 29.12.2020. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 146 экз. Заказ 219.

Цена: индивидуальная подписка – 12,32 руб.; ведомственная подписка – 29,31 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

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

© «Издательский дом «Беларуская навука».  
Доклады НАН Беларуси, 2020

# DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

---

MINSK. BELARUSKAYA NAVUKA. 2020. Vol. 64. 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 Vice Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
(Associate Editor-in-Chief)

**Sergey Ya. Kilin**

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

**Alexander V. Kilchevsky**

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

**Tatiana P. Petrovich**

(Lead editor)

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

**Alexey Ye. Dayneko** – Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

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

**Sergey V. Gubkin** – Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**Andrei I. Ivanets** – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

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

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

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

**Gennady P. Korshunov** – Institute of Sociology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

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

**Nikolay P. Krutko** – Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Minsk, Belarus

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

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

**Sergey V. Lemeshevsky** – Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**Olga N. Levko** – Institute of History of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
**Vladimir F. Loginov** – Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
**Anatoly A. Makhnach** – Institute of Geology, Minsk, Belarus  
**Alexander A. Mikhalevich** – Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
**Mikhail Ye. Nikiforov** – Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources, Minsk, Belarus  
**Valentin A. Orlovich** – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
**Oleg G. Penyazkov** – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
**Yuri M. Pleskachevsky** – Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus  
**Nikolay S. Serdyuchenko** – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
**Ivan P. Sheyko** – Scientific and Practical Center for Animal Breeding, Zhodino, Belarus  
**Arnold F. Smeyanovich** – Republican Scientific and Practical Center of Neurology and Neurosurgery, Minsk, Belarus  
**Lev M. Tomilchik** – B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
**Alexander V. Tuzikov** – United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
**Sergey A. Usanov** – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
**Petr A. Vityaz** – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
**Igor D. Volotovskiy** – Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
**Vitali G. Zaleski** – Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

#### Editorial Council

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

*Address of the Editorial Office:*

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

*Phone: +375 17 284-19-19; e-mail: doklady\_nanb@mail.ru*

*doklady.belnauka.by*

---

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS. 2020. Vol. 64. No. 6

*Printed in Russian, Belarusian and English languages*

---

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

Sent for press 04.12.2020. Output 29.12.2020. Format 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Offset paper.  
Digital press. Printed sheets 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 146 copies. Order 219.  
Price: individual subscription – 12,32 BYN, departmental subscription – 29,31 BYN.

Publisher and printing execution:

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

© RUE "Publishing House "Belaruskaya Navuka".  
Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАТЕМАТИКА

**Лиходед Н. А., Толстикова А. А.** Метод оценки локальности параллельных алгоритмов, ориентированных на компьютеры с распределенной памятью ..... 647

**Корзюк В. И., Рудько Я. В.** Классическое решение смешанной задачи для одномерного волнового уравнения с негладким вторым условием Коши..... 657

### ФИЗИКА

**Тимошенко Е. В., Юревич В. А.** Формализм вектора Блоха в задаче о нелинейном резонансном отклике квазидвумерного суперкристалла ..... 663

**Сидорова Т. Н., Данилюк А. Л., Борисенко В. Е.** Спин-зависимое туннелирование на поверхностные состояния диоксида титана..... 670

### ХИМИЯ

**Воробьева Е. В.** Влагопоглощающие материалы на основе полимерного гидрогеля и бентонита..... 678

### БИОЛОГИЯ

**Волнистый А. А., Гомель К. В., Хейдорова Е. Э., Шпак А. В., Никифоров М. Е.** Молекулярно-генетический полиморфизм популяций американской норки (*Neovison vison*) в модельных звероводческих хозяйствах и на прилегающих к ним территориях в Беларуси (на англ. яз.)..... 685

**Ильчук И. А., Никандров В. Н.** О протеолитической активности субклеточных фракций клеток *Chlorella vulgaris* штамма C 111 IBCE C-19..... 694

**Бабак О. Г., Игнатова С. И., Голубкина Н. А., Некрашевич Н. А., Анисимова Н. В., Никитинская Т. В., Яцевич К. К., Кильчевский А. В.** Анализ полиморфизма гена *SIMYB12*, детерминирующего биосинтез халкон-нарингина в кожице плодов томата, и его влияния на накопление ликопина..... 702

### МЕДИЦИНА

**Сутько И. П., Шляхтун А. Г., Титко О. В., Янкевич Н. В., Колодко А. В., Телегин П. Г., Зверинский И. В., Семененя И. Н.** Оценка эффективности применения комбинации силимарина и берберина в составе самоэмульгирующейся системы при экспериментальном поражении печени парацетамолом ..... 713

**Руденко Е. В., Тябут Т. Д., Буглова А. Е., Бабак Г. А., Морозик П. М., Борисенко Т. Д.** Частота встречаемости гиповитаминоза D и ассоциации плазменной концентрации 25(OH)D с показателями активности заболевания у пациентов с ревматоидным артритом ..... 723

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Ильющенко А. Ф., Дьячкова Л. Н., Осипов В. А.** Сложнопрофильные элементы аэрокосмической техники из реакционноспеченной карбидокремниевой керамики ..... 730

**Хейфец М. Л.** Проектирование механотронных технологических комплексов для традиционного и аддитивного производства ..... 739

**Лещевич В. В., Пенязков О. Г., Шимченко С. Ю.** Особенности самовоспламенения паров н-декана в воздухе при температурах 600–800 К ..... 747

### АГРАРНЫЕ НАУКИ

**Шейко И. П., Тимошенко Т. Н., Приступа Н. В., Янович Е. А., Заяц В. Н., Шейко Р. И., Казаровец И. Н., Бурнос А. Ч., Коско И. С.** Новые селекционно-генетические методы в свиноводстве Беларуси..... 757

**CONTENTS***MATHEMATICS*

- Likhoded N. A., Tolstikau A. A.** Locality estimation of parallel algorithms for distributed memory computers... 647
- Korzyuk V. I., Rudzko J. V.** Classical solution of the mixed problem for the one-dimensional wave equation with the nonsmooth second initial condition ..... 657

*PHYSICS*

- Timoshchenko E. V., Yurevich V. A.** Bloch vector formalism in the problem of nonlinear resonant response of a quasi-two-dimensional supercrystal..... 663
- Sidorova T. N., Danilyuk A. L., Borisenko V. E.** Spin-dependent tunneling to the surface states of titanium dioxide ..... 670

*CHEMISTRY*

- Vorobieva E. V.** Water-absorbing materials based on polymer hydrogel and bentonite ..... 678

*BIOLOGY*

- Valnisty A. A., Homel K. V., Kheidorova E. E., Shpak A. V., Nikiforov M. E.** Molecular genetic polymorphism of American mink populations (*Neovison vison*) in model fur farms and on the adjacent territories in Belarus ..... 685
- Ilyuchyk I. A., Nikandrov V. N.** On proteolytic activity of subcellular fractions of *Chlorella vulgaris* strain C 111 IBCE C-19 cell ..... 694
- Babak O. G., Ignatova S. I., Golubkina N. A., Nekrashevich N. A., Anisimova N. A., Nikitinskaya T. V., Yatsevich K. K., Kilchevsky A. V.** Analysis of the *SIMYB12* gene polymorphism determining chalcone-naringenin biosynthesis in the skin of tomato fruits and its effect on the lycopene accumulation..... 702

*MEDICINE*

- Sutsko I. P., Shlyahatun A. G., Titko A. V., Yankevich N. V., Kolodko A. V., Telegin P. G., Zverinsky I. V., Semeneyna I. N.** Evaluation of silymarin and berberine efficiencies in the self-emulsifying drug delivery system in paracetamol-induced experimental toxic liver injury ..... 713
- Rudenka A. V., Tyabut T. D., Buglova A. E., Babak G. A., Morozik P. M., Borisenko T. D.** Rate of hypovitaminosis D and association of plasma concentration of 25(OH)D with indicators of disease activity in patients with rheumatoid arthritis..... 723

*TECHNICAL SCIENCES*

- Ilyushchanka A. Ph., Dyachkova L. N., Osipov V. A.** Complex elements of aerospace equipment from reaction silicon carbide ceramics ..... 730
- Kheifetz M. L.** Design of mechatronic technological complexes for traditional and additive manufacturing ..... 739
- Leschevich V. V., Penyazkov O. G., Shimchenko S. Yu.** Specific features of n-decane vapors self-ignition in air at temperatures of 600–800 K ..... 747

*AGRARIAN SCIENCES*

- Sheyko I. P., Timoshenko T. N., Pristupa N. V., Yanovich E. A., Zayats V. N., Sheyko R. I., Kazarovets I. N., Burnos A. Ch., Kosko I. S.** New breeding and genetic methods in pig breeding in Belarus ISSN 1561-8323 (Print)..... 757

**МАТЕМАТИКА**  
**MATHEMATICS**

УДК 519.67

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-647-656>

Поступило в редакцию 02.11.2020

Received 02.11.2020

**Н. А. Лиходед, А. А. Толстикова***Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь***МЕТОД ОЦЕНКИ ЛОКАЛЬНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ,  
ОРИЕНТИРОВАННЫХ НА КОМПЬЮТЕРЫ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПАМЯТЬЮ***(Представлено членом-корреспондентом Л. А. Яновичем)*

**Аннотация.** Степень использования памяти с быстрым доступом отражает вычислительное свойство алгоритма, называемое локальностью. Для параллельных компьютеров с распределенной памятью быстрой считается локальная память вычислительного узла. При реализации алгоритмов на многопроцессорных вычислительных устройствах использование локальности играет важнейшую роль для достижения высокой производительности. Основной задачей исследования локальности параллельного алгоритма является оценка числа и объема коммуникационных операций. В этой работе сформулированы и доказаны утверждения, позволяющие получить асимптотические оценки объема коммуникационных операций вычислительных процессов, реализуемых на параллельных компьютерах с распределенной памятью. Получены выражения, характеризующие число данных, для которых требуются коммуникации, и число процессов, вовлеченных в пересылки этих данных. Эти оценки могут быть использованы для сравнения коммуникационных затрат при получении альтернативных вариантов параллельных алгоритмов.

**Ключевые слова:** параллельные вычисления, параллельный компьютер с распределенной памятью, уменьшение обменов данными

**Для цитирования.** Лиходед, Н. А. Метод оценки локальности параллельных алгоритмов, ориентированных на компьютеры с распределенной памятью / Н. А. Лиходед, А. А. Толстикова // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 647–656. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-647-656>

**Nikolai A. Likhoded, Aliaksei A. Tolstikau***Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus***LOCALITY ESTIMATION OF PARALLEL ALGORITHM FOR DISTRIBUTED MEMORY COMPUTERS***(Communicated by Corresponding Member Leonid A. Yanovich)*

**Abstract.** Locality is an algorithm characteristic describing a usage level of fast access memory. For example, in case of distributed memory computers we focus on memory of each computational node. To achieve the high performance of algorithm implementation one should choose the best possible locality option. Studying the parallel algorithm locality is to estimate the number and volume of data communications. In this work, we formulate and prove the statements for computers with distributed memory that allow us to estimate the asymptotic volume of data communication operations. These estimation results are useful while comparing alternative versions of parallel algorithms during data communication cost analysis.

**Keywords:** parallel computing, distributed memory parallel computer, data communication reducing

**For citation:** Likhoded N. A., Tolstikau A. A. Locality estimation of parallel algorithm for distributed memory computers. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 647–656 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-647-656>

**Введение.** Локальность алгоритма – это вычислительное свойство алгоритма, отражающее степень использования памяти с быстрым доступом. При многопроцессорной обработке памяти с быстрым доступом считается локальная память процессора, при однопроцессорной – кэш-память. При реализации алгоритмов на многопроцессорных вычислительных устройствах

использование локальности играет важнейшую роль для достижения высокой производительности [1].

В качестве целевого компьютера для реализации алгоритмов будем рассматривать параллельный компьютер с распределенной памятью. Параллельные алгоритмы для компьютеров с распределенной памятью должны быть зернистыми: множество операций алгоритма должно быть разбито на множества, называемые зёрнами вычислений. Можно использовать тайлинг (tiling) – преобразование алгоритма для получения макроопераций-тайлов [2; 3]. Операции одного тайла выполняются атомарно, как одна единица вычислений, а обмен данными происходит массивами.

Локальность параллельного алгоритма, предназначенного для реализации на компьютерах с распределенной памятью, характеризует коммуникационные затраты: чем меньше при заданном числе вычислительных ядер суммарный объем операций обмена данными, тем лучше локальность. Задачей исследования локальности параллельного алгоритма является оценка числа и объема коммуникационных операций. На локальность влияет также структура операций обмена данными: число и топология («близость») процессов, вовлеченных в групповые коммуникации. Хорошей локальности можно достичь путем преобразования алгоритмов и/или удачного распределения операций и данных между процессорами [4–7].

Целью этой работы является разработка метода оценки коммуникационных затрат альтернативных вариантов организации одномерных вычислительных процессов. Используется анализ информационных зависимостей, порождающих коммуникационные операции. Сформулированы и доказаны утверждения, позволяющие получить асимптотические оценки объема коммуникационных операций. Эти оценки могут быть использованы для сравнения коммуникационных затрат при получении альтернативных вариантов параллельных алгоритмов (в том числе и при автоматическом распараллеливании).

В [8] подобные оценки получены для случая, когда целевым вычислительным устройством является графический процессор. Отметим, что получение оценок для случая компьютера с распределенной памятью является задачей более сложной: для каждой из зависимостей, порождающих коммуникационные операции, в исследованиях участвуют не одна, как в случае графического процессора, а две координаты итерационных пространств; кроме того, в исследованиях участвуют две, не обязательно совпадающие, функции назначения операций процессорам.

**Предварительные сведения.** Приведем некоторые сведения о рассматриваемом классе алгоритмов и об информационных зависимостях между операциями алгоритма.

Будем считать, что алгоритм задан последовательной программой линейного класса [4]. Основную вычислительную часть такой программы составляют циклы произвольной структуры вложенности; границы изменения параметров циклов задаются неоднородными формами, линейными по совокупности параметров циклов и внешних переменных; шаги изменения параметров циклов равны 1. Пусть в гнезде циклов имеется  $K$  выполняемых операторов  $S_\beta$  и используется  $L$  массивов  $a_l$ . Область изменения параметров циклов для оператора  $S_\beta$  и размерность этой области обозначим соответственно  $V_\beta$  и  $n_\beta$ ; через  $a_l$  обозначим размерности массивов  $a_l$ .

Пусть в гнезде циклов имеется  $\Theta$  наборов выполняемых операторов. Под набором операторов будем понимать один или несколько выполняемых операторов, окруженных одним и тем же множеством циклов. Выполняемые операторы и наборы операторов линейно упорядочены расположением их в записи алгоритма. Обозначим  $V^\theta$ ,  $1 \leq \theta \leq \Theta$ , – область изменения параметров циклов, окружающих  $\theta$ -й набор операторов;  $n^\theta$  – размерность этой области (число циклов, окружающих  $\theta$ -й набор операторов).

Вхождением  $(a, S_\beta, q)$  будем называть  $q$ -е вхождение массива  $a$  в оператор  $S_\beta$ . Индексы элементов  $l$ -го массива, связанных с вхождением  $(a_l, S_\beta, q)$ , выражаются функцией вида

$$\bar{F}_{a_l, S_\beta, q}(J) = F_{a_l, S_\beta, q} J + f^{a_l, S_\beta, q}, \quad J(j_1, \dots, j_{n_\beta}) \in V_\beta, \quad F_{a_l, S_\beta, q} \in \mathbf{Z}^{v_l \times n_\beta}, \quad f^{a_l, S_\beta, q} \in \mathbf{Z}^{v_l}.$$

Выполнение оператора  $S_\beta$  при конкретных значениях  $\beta$  и вектора параметров цикла  $J$  будем называть операцией и обозначать  $S_\beta(J)$ . Пара вхождений  $(a, S_\alpha, 1)$  и  $(a, S_\beta, q)$  порождает истинную зависимость  $S_\alpha(I) \rightarrow S_\beta(J)$ , если:  $S_\alpha(I)$  выполняется раньше  $S_\beta(J)$ ;  $S_\alpha(I)$  переопределяет

(изменяет) элемент массива  $a$ , а  $S_\beta(J)$  использует этот элемент массива в качестве аргумента; между операциями  $S_\alpha(I)$  и  $S_\beta(J)$  этот элемент не переопределяется. Истинные зависимости и входные данные алгоритма порождают коммуникационные операции.

Зависимости между операциями можно задать функциями вида

$$\bar{\Phi}_{\alpha,\beta}(J) = \Phi_{\alpha,\beta}J + \Psi_{\alpha,\beta}N - \varphi^{\alpha,\beta}, J \in V_{\alpha,\beta}, N \in \mathbb{Z}^s, \Phi_{\alpha,\beta} \in \mathbb{Z}^{n_\alpha \times n_\beta}, \Psi_{\alpha,\beta} \in \mathbb{Z}^{n_\alpha \times s}, \varphi^{\alpha,\beta} \in \mathbb{Z}^{n_\alpha},$$

где  $N \in \mathbb{Z}^s$  – вектор внешних переменных алгоритма;  $s$  – число внешних переменных. Функция зависимостей  $\bar{\Phi}_{\alpha,\beta}(J)$  позволяет для операции  $S_\beta(J)$  найти операцию  $S_\alpha(I)$ , от которой  $S_\beta(J)$  зависит.

Пр и м е р. Основную вычислительную часть алгоритма, реализующего двухшаговую разностную схему продольно-поперечной прогонки, можно представить в следующем виде (циклы, итерации которых можно выполнять независимо, записаны как *dopar*):

```

do j = 1, j_0
  dopar i_2 = 1, N_2 - 1
    do i_1 = 1, N_1 - 1
      S_1:   alpha(i_1 + 1) = F(alpha(i_1))
      S_2:   beta(i_1 + 1) = F_2(alpha(i_1), beta(i_1), y_(2)(i_1, i_2), y_(2)(i_1, i_2 - 1), y_(2)(i_1, i_2 + 1))
    enddo
    do i_1 = 1, N_1 - 1
      S_3:   y_(1)(N_1 - i_1, i_2) = alpha(N_1 - i_1 + 1) y_(1)(N_1 - i_1 + 1, i_2) + beta(N_1 - i_1 + 1)
    enddo
  enddopar
  dopar i_1 = 1, N_1 - 1
    do i_2 = 1, N_2 - 1
      S_4:   alpha(i_2 + 1) = F_3(alpha(i_2))
      S_5:   beta(i_2 + 1) = F_4(alpha(i_2), beta(i_2), y_(1)(i_1, i_2), y_(1)(i_1 - 1, i_2), y_(1)(i_1 + 1, i_2))
    enddo
    do i_2 = 1, N_2 - 1
      S_6:   y_(2)(i_1, N_2 - i_2) = alpha(N_2 - i_2 + 1) y_(2)(i_1, N_2 - i_2 + 1) + beta(N_2 - i_2 + 1)
    enddo
  enddopar
enddo(j)
    
```

Здесь  $alpha(i)$  и  $beta(i)$  – коэффициенты прогонок, возникающих при решении промежуточных систем линейных алгебраических уравнений. Конечные значения  $y_{(2)}(i_1, i_2)$  являются выходными данными алгоритма.

Приведем функции истинных зависимостей алгоритма продольно-поперечной прогонки (найти их можно исходя из определения зависимостей или методом работы [4]):  $\bar{\Phi}_{1,1}(j, i_2, i_1) = \bar{\Phi}_{1,2}(j, i_2, i_1) = \bar{\Phi}_{2,2}(j, i_2, i_1) = \bar{\Phi}_{3,3}(j, i_2, i_1) = (j, i_2, i_1) - (0, 0, 1)$ ,

$$\bar{\Phi}_{1,3}(j, i_2, i_1) = \bar{\Phi}_{2,3}(j, i_2, i_1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j \\ i_2 \\ i_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j_0 \\ N_1 \\ N_2 \end{pmatrix},$$

$$\bar{\Phi}_{6,2}(j, i_2, i_1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j \\ i_2 \\ i_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j_0 \\ N_1 \\ N_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ \varphi_2 \\ 0 \end{pmatrix},$$

где  $\varphi_2$  равно 0, 1, -1,

$$\bar{\Phi}_{3,5}(j, i_1, i_2) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j \\ i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j_0 \\ N_1 \\ N_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi_2 \\ 0 \end{pmatrix},$$

где  $\varphi_2$  равно 0, 1, -1.

Функции  $\bar{\Phi}_{4,4}(j, i_1, i_2)$ ,  $\bar{\Phi}_{4,5}(j, i_1, i_2)$ ,  $\bar{\Phi}_{5,5}(j, i_1, i_2)$ ,  $\bar{\Phi}_{6,6}(j, i_1, i_2)$  задаются такими же матрицами и векторами, как  $\bar{\Phi}_{1,1}$ , функции  $\bar{\Phi}_{4,6}(j, i_1, i_2)$ ,  $\bar{\Phi}_{5,6}(j, i_1, i_2)$  – как  $\bar{\Phi}_{1,3}$ .

**Организация параллельных зернистых вычислительных процессов.** Как уже отмечалось, тайлинг – это преобразование алгоритма для получения макроопераций, называемых также зерном вычислений, или тайлами. При тайлинге каждый цикл разбивается на два цикла: глобальный, параметр которого определяет на данном уровне вложенности порядок вычисления тайлов, и локальный, в котором параметр исходного цикла изменяется в границах одного тайла. Если разбиение не производить и все итерации считать принадлежащими глобальному циклу, то получим так называемый глобальный неразбиваемый цикл; если все итерации отнести к локальному циклу, то получим локальный неразбиваемый цикл. Перестановкой и распределением циклов алгоритм преобразуется таким образом, чтобы глобальные циклы были внешними по отношению к локальным.

Пусть  $m_\zeta^\theta = \min_{J(j_1, j_2, \dots, j_{n^\theta}) \in V^\theta} j_\zeta$ ,  $M_\zeta^\theta = \max_{J(j_1, j_2, \dots, j_{n^\theta}) \in V^\theta} j_\zeta$ ,  $1 \leq \zeta \leq n^\theta$ , – предельные значения изменения параметров циклов. Будем считать, что  $m_\zeta^\theta$  не зависит от внешних переменных, а  $M_\zeta^\theta$  может зависеть от внешних переменных:  $M_\zeta^\theta = M^{\theta, N}(\zeta)N + M_\zeta^{\theta, 1}(M^{\theta, N}(\zeta) - \text{вектор-строка})$ . Если два набора операторов имеют общий цикл с параметром  $j_\zeta$ , то  $m_\zeta^{\theta_1} = m_\zeta^{\theta_2}$ ,  $M_\zeta^{\theta_1} = M_\zeta^{\theta_2}$ .

Размеры тайлов задаются натуральными числами  $r_1^\theta, \dots, r_{n^\theta}^\theta$ . Параметр  $r_\zeta^\theta$  обозначает число значений параметра цикла  $j_\zeta$ , приходящихся на один тайл  $\theta$ -го набора операторов. Число частей  $Q_\zeta^\theta$ , на которые при формировании тайлов разбивается область значений параметра  $j_\zeta$  цикла, окружающего  $\theta$ -й набор операторов, находится согласно  $Q_\zeta^\theta = \lceil (M_\zeta^\theta - m_\zeta^\theta + 1) / r_\zeta^\theta \rceil$  (использовано обозначение «ближайшее сверху целое число»). Тайлы нумеруются по каждой координате в пределах от 0 до  $Q_\zeta^\theta - 1$ ,  $1 \leq \zeta \leq n^\theta$ .

Обозначим  $V^{\theta, \text{gl}}$ ,  $V_{J^{\text{gl}}}^\theta$  – области изменения параметров соответственно глобальных (уровня тайлов) и локальных (уровня операций тайлов) циклов. Каждый тайл можно обозначить некоторым вектором  $J^{\text{gl}}$  или, подробнее, вектором  $J^{\text{gl}}(j_1^{\text{gl}}, \dots, j_{n^\theta}^{\text{gl}})$ .

Будем рассматривать следующий способ получения зернистых (т. е. уровня макроопераций-тайлов) вычислительных процессов [9; 10]. К одному процессу отнесем вычисления тайлов с одинаковыми значениями функций  $\text{Pr}^\theta(J^{\text{gl}})$ ,  $1 \leq \theta \leq \Theta$ ,  $J^{\text{gl}} \in V^{\theta, \text{gl}}$ , отображающих тайлы на процессы. Будем полагать

$$\text{Pr}^\theta(J^{\text{gl}}(j_1^{\text{gl}}, \dots, j_{n^\theta}^{\text{gl}})) = j_\zeta^{\text{gl}} \quad (1)$$

или

$$\text{Pr}^\theta(J^{\text{gl}}(j_1^{\text{gl}}, \dots, j_{n^\theta}^{\text{gl}})) = Q_\zeta^\theta - j_\zeta^{\text{gl}} - 1. \quad (2)$$

Функция  $\text{Pr}^\theta$  вида (1) или (2) задает вычислительный процесс  $\text{Pr}^\theta(J^{\text{gl}})$  выполнения операций тайлов  $J^{\text{gl}}$  с одинаковыми значениями  $\zeta$ -й координаты  $j_\zeta^{\text{gl}}$  векторов  $J^{\text{gl}}$ .

**Оценка коммуникационных затрат.** Приведем сначала сведения о числе фиксированных данных массива, используемых на вхождениях в операторы. Термин «фиксированное данное массива» определяет конкретное, неизмененное содержимое соответствующей ячейки памяти.

Пусть вхождение  $(a_l, S_\beta, q)$  в правую часть некоторого оператора порождает истинную зависимость,  $\bar{\Phi}_{\alpha, \beta}$  – функция зависимостей. Обозначим через  $e_\zeta^{(n_\beta)}$  вектор-строку размера  $n_\beta$ , у которой координата с номером  $\zeta$  равна 1, а остальные координаты нулевые,

$$\rho_{a_l, S_{\beta}, q} = \text{rank } F_{a_l, S_{\beta}, q}, \rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\zeta} = \text{rank} \begin{pmatrix} F_{a_l, S_{\beta}, q} \\ e_{\zeta}^{(n_{\beta})} \end{pmatrix}, \rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\Phi} = \text{rank} \begin{pmatrix} F_{a_l, S_{\beta}, q} \\ \Phi_{\alpha, \beta} \end{pmatrix}, \rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\Phi, \zeta} = \text{rank} \begin{pmatrix} F_{a_l, S_{\beta}, q} \\ \Phi_{\alpha, \beta} \\ e_{\zeta}^{(n_{\beta})} \end{pmatrix}.$$

Всегда имеет место либо  $\rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\Phi, \zeta} = \rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\Phi}$ , либо  $\rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\Phi, \zeta} - 1 = \rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\Phi}$ . Если вхождение  $(a_l, S_{\beta}, q)$  не порождает истинную зависимость, то по определению  $\rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\Phi} = \rho_{a_l, S_{\beta}, q}$ ,  $\rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\Phi, \zeta} = \rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\zeta}$ .

Обозначим  $M^{\theta} = \max_{\zeta} (M_{\zeta}^{\theta} - m_{\zeta}^{\theta}) + 1$  – наибольшее число итераций циклов, участвующих в получении тайлов. Для простоты записи будем использовать обозначение  $M$  без индекса  $\theta$ , где будет подразумеваться набор операторов  $\theta^{\beta}$  при упоминании оператора  $S_{\beta}$ . Фактически предполагается, что число итераций всех циклов, участвующих в получении тайлов, равно  $M$ . Подобного рода предположения накладываются для возможности формулировать и строго доказывать содержательные утверждения.

Отметим, что величина  $Q_{\zeta}^{\theta} r_{\zeta}^{\theta}$  имеет порядок  $M$ . Если число частей  $Q_{\zeta}^{\theta}$ , на которые при формировании тайлов разбивается область значений параметра  $j_{\zeta}$ , фиксировано, то порядок  $M$  имеет величина  $r_{\zeta}^{\theta}$ ; в этом случае  $r_{\zeta}^{\theta}$  зависит от внешних переменных. Если зафиксировать  $r_{\zeta}^{\theta}$ , то порядок  $M$  имеет  $Q_{\zeta}^{\theta}$ .

**Л е м м а [8].** Число фиксированных данных, используемых на вхождении  $(a_l, S_{\beta}, q)$  в правой части оператора  $S_{\beta}$ , при фиксированном значении цикла с параметром  $j_{\zeta}$ , оценивается величиной  $O(M^{\rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\Phi, \zeta}})$ . Число фиксированных данных, используемых на вхождении  $(a_l, S_{\beta}, q)$ , оценивается величиной  $O(M^{\rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\Phi}})$ . Число фиксированных данных, используемых на вхождении  $(a_l, S_{\beta}, q)$ , при фиксированном значении глобального цикла с параметром  $j_{\zeta}^{\text{gl}}$  оценивается величиной  $O(M^{\rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\Phi}})$ , если  $\rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\Phi, \zeta} - 1 = \rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\Phi}$ , и величиной  $O(r_{\zeta}^{\beta} M^{\rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\Phi}})$ , если  $\rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\Phi, \zeta} = \rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\Phi}$ .

Обозначим через  $(\Phi_{\alpha, \beta})_{\zeta}$  и  $(\Psi_{\alpha, \beta})_{\zeta}$  строки матриц с номером  $\zeta$ . Не ограничивая общности, будем считать, что операторы  $S_{\alpha}$  и  $S_{\beta}$  принадлежат группам операторов с номерами  $\alpha$  и  $\beta$  ( $\alpha$  и  $\beta$  могут и совпадать). Для оператора  $S_{\alpha}$  обозначим  $\zeta$ -ю координату из равенств (1), (2) через  $j_{\zeta}^{\text{gl}}$ , а для оператора  $S_{\beta}$  – через  $j_{\zeta}^{\text{gl}}$ . Обозначим

$$d_{\alpha, \beta} = m_{\zeta}^{\beta} - \varphi_{\zeta}^{\alpha, \beta} - m_{\zeta}^{\alpha}.$$

**Т е о р е м а 1.** Пусть определение элемента некоторого массива  $a_l$  происходит на вхождении  $(a, S, 1)$  в левой части оператора  $S_{\alpha}$ , а использование – на вхождении  $(a_l, S_{\beta}, q)$  в правой части оператора  $S_{\beta}$ ,

$$\text{Pr}^{\alpha}(J^{\text{gl}}(j_1^{\text{gl}}, \dots, j_n^{\text{gl}})) = j_{\zeta}^{\text{gl}}, \text{Pr}^{\beta}(J^{\text{gl}}(j_1^{\text{gl}}, \dots, j_n^{\text{gl}})) = j_{\zeta}^{\text{gl}}.$$

Тогда, при реализации алгоритма на компьютере с распределенной памятью, объем коммуникационных операций, связанных с вхождением  $(a_l, S_{\beta}, q)$ , имеет следующие оценки:

1) если выполняются условия

$$(\Phi_{\alpha, \beta})_{\zeta}^{\alpha} = e_{\zeta}^{(n_{\beta})}, \tag{3}$$

$$(\Psi_{\alpha, \beta})_{\zeta}^{\alpha} = 0, \tag{4}$$

$$r_{\zeta}^{\beta} = r_{\zeta}^{\alpha} \tag{5}$$

и  $d_{\alpha, \beta} = 0$ , то коммуникационных операций не требуется;

2) если выполняются условия (3)–(5) и  $0 < |d_{\alpha, \beta}| < r_{\zeta}^{\beta}$ , то процессам требуется получить  $O(Q_{\zeta}^{\beta} M^{\rho_{a_l, S_{\beta}, q}^{\Phi}})$  данных; коммуникационные операции происходят между процессами, номера которых отличаются на 1;

3) если выполняются условия (3)–(5) и  $|d_{\alpha,\beta}| \geq r_{\zeta\beta}^\beta$ , или выполняются условия (3), (5), но условие (4) не выполняется, то процессам требуется получить  $O(M_{a_l, S_\beta, q}^{\Phi})$  данных; коммуникационные операции происходят между процессами, номера которых отличаются не менее чем на 1.

В случае, когда вхождение  $(a_l, S_\beta, q)$  не порождает истинной зависимости между итерациями алгоритма (происходит обращение к входным данным) или равенство (3) не выполняется (тогда вычисления требуют групповых коммуникационных операций), оценки следующие:

4) если выполняется условие  $\rho_{a_l, S_\beta, q}^{\Phi, \zeta\beta} = \rho_{a_l, S_\beta, q}^\Phi$ , то требуется получить  $O(M_{a_l, S_\beta, q}^{\Phi})$  данных;

5) если выполняется условие  $\rho_{a_l, S_\beta, q}^{\Phi, \zeta\beta} - 1 = \rho_{a_l, S_\beta, q}^\Phi$ , то требуется получить  $O(Q_{\zeta\beta}^\beta M_{a_l, S_\beta, q}^{\Phi})$  данных.

**Доказательство.** Пусть  $I(i_1, \dots, i_{n_\alpha}) \in V_{I^{\text{gl}}}^\alpha$  и  $J(j_1, \dots, j_{n_\beta}) \in V_{J^{\text{gl}}}^\beta$  – две зависимые итерации. Определение элемента массива происходит в процессе  $\text{Pr}^\alpha(I^{\text{gl}}(i_1^{\text{gl}}, \dots, i_{n_\alpha}^{\text{gl}})) = j_{\zeta\alpha}^{\text{gl}}$ , а использование – в процессе  $\text{Pr}^\beta(J^{\text{gl}}(j_1^{\text{gl}}, \dots, j_{n_\beta}^{\text{gl}})) = j_{\zeta\beta}^{\text{gl}}$ . Тогда

$$\text{Pr}^\alpha(I^{\text{gl}}(i_1^{\text{gl}}, \dots, i_{n_\alpha}^{\text{gl}})) = j_{\zeta\alpha}^{\text{gl}} = \left\lfloor \frac{1}{r_{\zeta\alpha}^\alpha} \left( j_{\zeta\beta}^{\text{gl}} + \left( (\Phi_{\alpha,\beta})_{\zeta\alpha} - e_{\zeta\beta}^{(n_\beta)} \right) J + (\Psi_{\alpha,\beta})_{\zeta\alpha} N + d_{\alpha,\beta} - m_{\zeta\beta}^\beta \right) \right\rfloor.$$

Если выполняются условия (3)–(5) и  $d_{\alpha,\beta} = 0$ , то

$$\text{Pr}^\alpha(I^{\text{gl}}(i_1^{\text{gl}}, \dots, i_{n_\alpha}^{\text{gl}})) = \left\lfloor \frac{1}{r_{\zeta\beta}^\beta} (j_{\zeta\beta}^{\text{gl}} - m_{\zeta\beta}^\beta) \right\rfloor = j_{\zeta\beta}^{\text{gl}} = \text{Pr}^\beta(J^{\text{gl}}(j_1^{\text{gl}}, \dots, j_{n_\beta}^{\text{gl}})),$$

первое утверждение теоремы справедливо.

Если выполняются условия (3)–(5) и  $0 < |d_{\alpha,\beta}| < r_{\zeta\beta}^\beta$ , то

$$\text{Pr}^\alpha(I^{\text{gl}}(i_1^{\text{gl}}, \dots, i_{n_\alpha}^{\text{gl}})) = \left\lfloor \frac{1}{r_{\zeta\beta}^\beta} (j_{\zeta\beta}^{\text{gl}} - m_{\zeta\beta}^\beta + d_{\alpha,\beta}) \right\rfloor.$$

Это выражение отличается от  $\left\lfloor \frac{1}{r_{\zeta\beta}^\beta} (j_{\zeta\beta}^{\text{gl}} - m_{\zeta\beta}^\beta) \right\rfloor$  на  $|d_{\alpha,\beta}|$  итерациях из каждых  $r_{\zeta\beta}^\beta$  подряд идущих итераций  $j_{\zeta\beta}^{\text{gl}}$ . Для этих итераций  $j_{\zeta\beta}^{\text{gl}}$  значения  $\text{Pr}^\alpha(I^{\text{gl}}(i_1^{\text{gl}}, \dots, i_{n_\alpha}^{\text{gl}}))$  и  $\text{Pr}^\beta(J^{\text{gl}}(j_1^{\text{gl}}, \dots, j_{n_\beta}^{\text{gl}}))$  отличаются на 1, а для других  $r_{\zeta\beta}^\beta - |d_{\alpha,\beta}|$  итераций – совпадают; для использования требуются коммуникационные операции между процессами, номера которых отличаются на 1. Множество итераций цикла с параметром  $j_{\zeta\beta}^{\text{gl}}$  разбивается на  $Q_{\zeta\beta}^\beta$  частей. Из равенства  $(\Phi_{\alpha,\beta})_{\zeta\alpha} = e_{\zeta\beta}^{(n_\beta)}$  следует, что выполняется равенство  $\rho_{a_l, S_\beta, q}^{\Phi, \zeta\beta} = \rho_{a_l, S_\beta, q}^\Phi$ . Поэтому, как следует из леммы, в каждой из  $Q_{\zeta\beta}^\beta$  частей требуется получить  $|d_{\alpha,\beta}| O(M_{a_l, S_\beta, q}^{\Phi, \zeta\beta})$  данных из общего числа  $O(r_{\zeta\beta}^\beta M_{a_l, S_\beta, q}^{\Phi})$ , используемых в каждой части фиксированных данных (остальные данные находятся в локальной памяти). Так как величина  $|d_{\alpha,\beta}|$  не зависит от внешних переменных, то суммарный объем получаемых данных по всем  $Q_{\zeta\beta}^\beta$  частям определяется оценкой  $Q_{\zeta\beta}^\beta O(M_{a_l, S_\beta, q}^{\Phi, \zeta\beta}) = O(Q_{\zeta\beta}^\beta M_{a_l, S_\beta, q}^{\Phi})$ . Отметим, что при выборе малого размера тайла, когда  $|d_{\alpha,\beta}|$  близко по значению к  $r_{\zeta\beta}^\beta$ , полученная оценка близка к  $O(M_{a_l, S_\beta, q}^{\Phi, \zeta\beta})$ . Второе утверждение теоремы доказано.

Если выполняются условия (3)–(5) и  $|d_{\alpha,\beta}| \geq r_{\zeta^\beta}^\beta$ , или выполняются условия (3), (5), но условие (4) не выполняется, то  $\left[ \frac{1}{r_{\zeta^\alpha}^\alpha} \left( j_{\zeta^\beta} + (\Psi_{\alpha,\beta})_{\zeta^\alpha} N + d_{\alpha,\beta} - m_{\zeta^\beta}^\beta \right) \right]$  отличается от  $\left[ \frac{1}{r_{\zeta^\beta}^\beta} (j_{\zeta^\beta} - m_{\zeta^\beta}^\beta) \right]$  не менее чем на 1. Значит, значения  $\Pr^\alpha(I^{\text{gl}}(i_1^{\text{gl}}, \dots, i_{n^\alpha}^{\text{gl}}))$  и  $\Pr^\beta(J^{\text{gl}}(j_1^{\text{gl}}, \dots, j_{n^\beta}^{\text{gl}}))$  отличаются на 1 или более. Следовательно, в каждой из  $Q_{\zeta^\beta}^\beta$  частей, на которые разбивается множество итераций цикла с параметром  $j_{\zeta^\beta}$ , требуется получить все  $r_{\zeta^\beta}^\beta O(M^{\rho_{al,S\beta,q}^{\Phi,\zeta^\beta}}^{-1})$  данных, используемых в каждой части фиксированных данных. Как было замечено ранее, из равенства  $(\Phi_{\alpha,\beta})_{\zeta^\alpha} = e_{\zeta^\beta}^{(n^\beta)}$  следует, что выполняется равенство  $\rho_{al,S\beta,q}^{\Phi,\zeta^\beta} = \rho_{al,S\beta,q}^\Phi$ . Суммарный объем получаемых данных по всем  $Q_{\zeta^\beta}^\beta$  частям определяется оценкой  $Q_{\zeta^\beta}^\beta r_{\zeta^\beta}^\beta O(M^{\rho_{al,S\beta,q}^{\Phi,\zeta^\beta}}^{-1}) = O(M^{\rho_{al,S\beta,q}^\Phi})$ . Третье утверждение теоремы доказано.

Если равенство (3) не выполняется, то модуль разности чисел

$$\left[ \frac{1}{r_{\zeta^\alpha}^\alpha} \left( j_{\zeta^\beta} + \left( (\Phi_{\alpha,\beta})_{\zeta^\alpha} - e_{\zeta^\beta}^{(n^\beta)} \right) J + (\Psi_{\alpha,\beta})_{\zeta^\alpha} N + d_{\alpha,\beta} - m_{\zeta^\beta}^\beta \right) \right]$$

и  $\left[ \frac{1}{r_{\zeta^\beta}^\beta} (j_{\zeta^\beta} - m_{\zeta^\beta}^\beta) \right]$  зависит от  $J$ . Поэтому значения  $\Pr^\alpha(I^{\text{gl}}(i_1^{\text{gl}}, \dots, i_{n^\alpha}^{\text{gl}}))$  и  $\Pr^\beta(J^{\text{gl}}(j_1^{\text{gl}}, \dots, j_{n^\beta}^{\text{gl}}))$  могут быть, вообще говоря, любыми в диапазонах соответственно от 0 до  $Q_{\zeta^\alpha}^\alpha - 1$  и от 0 до  $Q_{\zeta^\beta}^\beta - 1$ ; вычисления требуют групповых коммуникационных операций (на практике, как правило, типа «каждый с каждым»).

Покажем справедливость четвертого и пятого утверждений теоремы. Если на вхождении  $(a_l, S_\beta, q)$  происходит обращение к входным данным или равенство (3) не выполняется (тогда, как было доказано, вычисления требуют групповых коммуникационных операций).

Если выполняется равенство  $\rho_{al,S\beta,q}^{\Phi,\zeta^\beta} = \rho_{al,S\beta,q}^\Phi$ , то в каждой из  $Q_{\zeta^\beta}^\beta$  частей требуется получить, как следует из леммы,  $O(r_{\zeta^\beta}^\beta M^{\rho_{al,S\beta,q}^\Phi}^{-1})$  данных. Тогда суммарный объем получаемых данных по  $Q_{\zeta^\beta}^\beta$  частям определяется оценкой  $Q_{\zeta^\beta}^\beta O(r_{\zeta^\beta}^\beta M^{\rho_{al,S\beta,q}^\Phi}^{-1}) = O(M^{\rho_{al,S\beta,q}^\Phi})$ .

Если выполняется равенство  $\rho_{al,S\beta,q}^{\Phi,\zeta^\beta} - 1 = \rho_{al,S\beta,q}^\Phi$ , то в каждой из  $Q_{\zeta^\beta}^\beta$  частей требуется получить  $O(M^{\rho_{al,S\beta,q}^\Phi})$  данных. Объем коммуникационных операций по всем  $Q_{\zeta^\beta}^\beta$  частям определяется оценкой  $Q_{\zeta^\beta}^\beta O(M^{\rho_{al,S\beta,q}^\Phi}) = O(Q_{\zeta^\beta}^\beta M^{\rho_{al,S\beta,q}^\Phi})$ . Теорема доказана.

**П р и м е р** (продолжение). Итерации циклов уровня вложенности 2 можно выполнять независимо. Если распределение операций между процессами задать функциями вида (1),  $\zeta = 2$ , то получим известный параллельный алгоритм, основанный на естественном параллелизме (при фиксированных  $j$ ).

Для всех зависимостей имеем  $\zeta^\alpha = \zeta^\beta = 2$ ,  $m_{\zeta^\alpha}^\alpha = m_{\zeta^\beta}^\beta = 1$ . Пусть  $j_0 = N_1 - 1 = N_2 - 1 = M$ ; положим  $r_1^\beta = r_1^\alpha = 1$ ,  $r_{\zeta^\beta}^\beta = r_{\zeta^\alpha}^\alpha$ ,  $r_3^\beta = r_3^\alpha = M + 1$ . Применим теорему 1 для оценки объема данных, которые требуется получить процессам. Условия (3)–(5) и  $d_{\alpha,\beta} = 0$  выполняются для всех зависимостей, кроме зависимостей, задаваемых функциями  $\bar{\Phi}_{6,2}$  и  $\bar{\Phi}_{3,5}$ .

Коммуникационные операции порождаются только функциями  $\bar{\Phi}_{6,2}$  и  $\bar{\Phi}_{3,5}$ . Имеем:  $\rho_{al,S\beta,q}^{\Phi,\zeta} = \rho_{al,S\beta,q}^\Phi = 3$ . Требуется получить  $O(M^3)$  данных, причем  $(\Phi_{\alpha,\beta})_2 = e_3^{(3)} \neq e_2^{(3)}$ , поэтому на каждом новом временном слое  $j$  вычисления требуют групповых коммуникационных операций

типа «каждый с каждым»: дважды происходит обращение каждого процесса к локальной памяти всех других процессов.

Обозначим  $r_{\alpha,\beta} = r_{\zeta^\beta}^\beta Q_{\zeta^\beta}^\beta - (M_{\zeta^\beta}^\beta - m_{\zeta^\beta}^\beta + 1)$  (если число  $(M_{\zeta^\beta}^\beta - m_{\zeta^\beta}^\beta + 1) / r_{\zeta^\beta}^\beta$  является целым, то  $r_{\alpha,\beta} = 0$ ),  $\bar{d}_{\alpha,\beta} = \varphi_{\zeta^\alpha}^{\alpha,\beta} + m_{\zeta^\alpha}^\alpha + M_{\zeta^\beta}^{\beta,1} + r_{\alpha,\beta}$ .

**Т е о р е м а 2.** Пусть определение элемента некоторого массива  $a_l$  происходит на вхождении  $(a_l, S_\alpha, 1)$  в левой части оператора  $S_\alpha$ , а использование – на вхождении  $(a_l, S_\beta, q)$  в правой части оператора  $S_\beta$  и

$$\Pr^\alpha(J^{\text{gl}}(j_1^{\text{gl}}, \dots, j_n^{\text{gl}})) = j_{\zeta^\alpha}^{\text{gl}}, \Pr^\beta(J^{\text{gl}}(j_1^{\text{gl}}, \dots, j_n^{\text{gl}})) = Q_{\zeta^\beta}^\beta - j_{\zeta^\beta}^{\text{gl}} - 1$$

или

$$\Pr^\alpha(J^{\text{gl}}(j_1^{\text{gl}}, \dots, j_n^{\text{gl}})) = Q_{\zeta^\alpha}^\alpha - j_{\zeta^\alpha}^{\text{gl}} - 1, \Pr^\beta(J^{\text{gl}}(j_1^{\text{gl}}, \dots, j_n^{\text{gl}})) = j_{\zeta^\beta}^{\text{gl}}.$$

Тогда, при реализации алгоритма на компьютере с распределенной памятью, объем коммуникационных операций, связанных с вхождением  $(a_l, S_\beta, q)$ , имеет следующие оценки:

1) если выполняются условия

$$(\Phi_{\alpha,\beta})_{\zeta^\alpha} = -e^{\binom{n_\beta}{\zeta^\beta}}, \quad (6)$$

$$(\Psi_{\alpha,\beta})_{\zeta^\alpha} = M^{\beta,N}(\zeta^\beta), \quad (7)$$

$$r_{\zeta^\beta}^{\beta} = r_{\zeta^\alpha}^\alpha, \quad Q_{\zeta^\beta}^\beta = Q_{\zeta^\alpha}^\alpha \quad (8)$$

и  $\bar{d}_{\alpha,\beta} = 0$ , то коммуникационных операций не требуется;

2) если выполняются условия (6)–(8) и  $0 < |\bar{d}_{\alpha,\beta}| < r_{\zeta^\beta}^\beta$ , то процессам требуется получить  $O(Q_{\zeta^\beta}^\beta M^{\rho_{al,S_\beta,q}^\Phi})$  данных; коммуникационные операции происходят между процессами, номера которых отличаются на 1;

3) если выполняются условия (6)–(8) и  $|\bar{d}_{\alpha,\beta}| \geq r_{\zeta^\beta}^\beta$ , или выполняются условия (6), (8), но условие (7) не выполняется, то процессам требуется получить  $O(M^{\rho_{al,S_\beta,q}^\Phi})$  данных; коммуникационные операции происходят между процессами, номера которых отличаются не менее чем на 1.

В случае, когда вхождение  $(a_l, S_\beta, q)$  не порождает истинной зависимости между итерациями алгоритма (происходит обращение к входным данным) или равенство (6) не выполняется (тогда вычисления требуют групповых коммуникационных операций), оценки следующие:

4) если выполняется условие  $\rho_{al,S_\beta,q}^{\Phi,\zeta^\beta} = \rho_{al,S_\beta,q}^\Phi$ , то требуется получить  $O(M^{\rho_{al,S_\beta,q}^\Phi})$  данных;

5) если выполняется условие  $\rho_{al,S_\beta,q}^{\Phi,\zeta^\beta} - 1 = \rho_{al,S_\beta,q}^\Phi$ , то требуется получить  $O(Q_{\zeta^\beta}^\beta M^{\rho_{al,S_\beta,q}^\Phi})$  данных.

Для доказательств утверждений теоремы используются аналогичные приемы и рассуждения, как и в случае теоремы 1.

Теорему 2 можно использовать, например, для улучшения локальности алгоритмов прогнозов, рассматривая зависимости между операциями прямого и обратного хода.

**П р и м е р** (продолжение). Рассмотрим альтернативный вариант распределения операций между процессами [11]: для операций, порождаемых операторами  $S_4, S_5, S_6$ , распределение по-прежнему определяется параллельными циклами уровня вложенности 2, а распределение операций, порождаемых операторами  $S_1, S_2, S_3$ , определяется циклами уровня вложенности 3 (все эти циклы имеют параметр  $i_1$ , изменяющийся от 1 до  $N_1 - 1$ ). Для операторов  $S_1, S_2$  используются функции вида (1),  $\zeta = 3$ ; для оператора  $S_3$  используется функция вида (2),  $\zeta = 3$ ;  $r_1^1 = r_1^2 = r_1^3 = 1$ ,  $r_2^1 = r_2^2 = r_2^3$ ,  $r_3^1 = r_3^2 = r_3^3$ ; для операторов  $S_4, S_5, S_6$  используются функции вида (1),  $\zeta = 2$ ;  $r_1^\alpha = 1$ ,  $r_2^\alpha = r_3^\alpha$ ,  $r_3^\alpha = N_2 - 1$ ,  $\alpha = 4, 5, 6$ .

Применим теоремы 1, 2 (полагая  $j_0 = N_1 - 1 = N_2 - 1 = M$ ) для оценки объема данных, которые требуется получить процессам, и покажем, что суммарный объем коммуникационных операций

уменьшается; кроме того, обмен происходит только между процессами, номера которых отличаются на 1. Как и ранее, функциями  $\bar{\Phi}_{4,4}$ ,  $\bar{\Phi}_{4,5}$ ,  $\bar{\Phi}_{5,5}$ ,  $\bar{\Phi}_{4,6}$ ,  $\bar{\Phi}_{5,6}$ ,  $\bar{\Phi}_{6,6}$  коммуникационные операции не порождаются (по теореме 1).

По теореме 2 функции  $\bar{\Phi}_{1,3}$  ( $\alpha = 1, \beta = 3$ ),  $\bar{\Phi}_{2,3}$  ( $\alpha = 2, \beta = 3$ ) и  $\bar{\Phi}_{3,5}$  ( $\alpha = 3, \beta = 5$ ) коммуникационных операций не порождают. Действительно,  $m_{\zeta^\alpha}^\alpha = 1$ ,  $M_{\zeta^\beta}^\beta = M^{\beta,N}(\zeta^\beta)(j_0 N_1 N_2)^T + M_{\zeta^\beta}^{\beta,1} = (0 \ 1 \ 0)(j_0 N_1 N_2)^T - 1$ . Положим  $r_{\zeta^\beta}^\beta = r_{\zeta^\alpha}^\alpha$ ; тогда удовлетворены условия (6)–(8). Кроме того,  $\bar{d}_{\alpha,\beta} = 0$  (в предположении  $r_{\alpha,\beta} = 0$ ):  $\varphi_{\zeta^\alpha}^{\alpha,\beta} + m_{\zeta^\alpha}^\alpha + M_{\zeta^\beta}^{\beta,1} + r_{\alpha,\beta} = 0 + 1 - 1 + 0 = 0$ .

В случае функций  $\bar{\Phi}_{1,1}$ ,  $\bar{\Phi}_{1,2}$ ,  $\bar{\Phi}_{2,2}$ ,  $\bar{\Phi}_{3,3}$  имеем  $\zeta^\alpha = \zeta^\beta = 3$ ,  $m_{\zeta^\beta}^\beta = m_{\zeta^\alpha}^\alpha = 1$ ,  $r_3^\beta = r_3^\alpha = M + 1$ ,  $d_{\alpha,\beta} = 1$ . По теореме 1 объем данных, которые требуется получить процессам, оценивается величиной  $O(Q_{\zeta^\beta}^\beta M^{P_{al,S\beta,q}^\Phi}) = O(Q_{\zeta^\beta}^\beta M^2)$ , обмен происходит только между процессами, номера которых отличаются на 1.

Рассмотрим случай функции  $\bar{\Phi}_{6,2}$ . Положим  $r_{\zeta^\beta}^\beta = r_{\zeta^\alpha}^\alpha$  и применим теорему 1 ( $\alpha = 6, \beta = 2$ ). Имеем:  $m_{\zeta^\alpha}^\alpha = m_{\zeta^\beta}^\beta = 1$ ,  $\varphi_{\zeta^\alpha}^{\alpha,\beta} = \varphi_2$ , где  $\varphi_2$  равно 0, 1, -1. Условия (6)–(8) выполняются. Условие  $m_{\zeta^\beta}^\beta = m_{\zeta^\alpha}^\alpha + \varphi_{\zeta^\alpha}^{\alpha,\beta}$  выполняется в случае  $\varphi_2 = 0$ ; определение и использование элемента массива данных происходит в одном и том же вычислительном процессе. Если  $\varphi_2 = 1$  или  $\varphi_2 = -1$ , то  $\left| m_{\zeta^\beta}^\beta - m_{\zeta^\alpha}^\alpha - \varphi_{\zeta^\alpha}^{\alpha,\beta} \right| = 1$ . Поэтому коммуникационные операции происходят между процессами, номера которых отличаются на 1.

Таким образом, применение альтернативного варианта параллельного алгоритма приводит к обмену  $O(Q_{\zeta^\beta}^\beta M^2)$  данными, для использования требуются коммуникационные операции между процессами, номера которых отличаются на 1. Применение параллельного алгоритма, основанного на естественном параллелизме, приводит к обмену  $O(M^3)$  данными, причем на каждом новом временном слое  $j$  вычисления требуют групповых коммуникационных операций типа «каждый с каждым».

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Конвергенция-2020», подпрограмма «Методы математического моделирования сложных систем».

**Acknowledgments.** The prepared report was sponsored by the Government program of scientific research of the Republic of Belarus “Convergence-2020”, subprogram “Methods of mathematical modeling of complex systems”.

### Список использованных источников

1. Воеводин, Вл. В. Спасительная локальность суперкомпьютеров / Вл. В. Воеводин, Вад. В. Воеводин // Открытые системы. – 2013. – № 9. – С. 12–15.
2. Xue, J. Time-minimal tiling when rise is larger than zero / J. Xue, W. Cai // Parallel Computing. – 2002. – Vol. 28, N 6. – P. 915–939. [https://doi.org/10.1016/s0167-8191\(02\)00098-4](https://doi.org/10.1016/s0167-8191(02)00098-4)
3. Dathathri, R. Compiling affine loop nests for a dynamic scheduling runtime on shared and distributed memory / R. Dathathri, R. T. Mullapudi, U. Bondhugula // ACM Transactions on Parallel Computing (TOPC). – 2016. – Vol. 3, N 2. – P. 1–28. <https://doi.org/10.1145/2948975>
4. Воеводин, В. В. Параллельные вычисления / В. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. – СПб., 2002. – 608 с.
5. Адуцкевич, Е. В. Согласованное получение конвейерного параллелизма и распределения операций и данных между процессорами / Е. В. Адуцкевич, Н. А. Лиходед // Программирование. – 2006. – Т. 35, № 3. – С. 52–65.
6. Automatic transformations for communication-minimized parallelization and locality optimization in the polyhedral model / U. Bondhugula [et al.] // Lecture notes in computer science. – 2008. – N 4959. – P. 132–146. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-78791-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-78791-4_9)
7. Лиходед, Н. А. Достаточные условия определения и использования данных в одном параллельном зернистом вычислительном процессе / Н. А. Лиходед // Журн. вычисл. математики и матем. физики. – 2014. – Т. 54, № 8. – С. 1356. <https://doi.org/10.7868/S0044466914080092>
8. Лиходед, Н. А. Метод ранжирования параметров размера блоков вычислений параллельного алгоритма / Н. А. Лиходед, М. А. Полещук // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2015. – Т. 59, № 4. – С. 25–33.
9. Гергель, В. П. Основы параллельных вычислений для многопроцессорных вычислительных систем / В. П. Гергель, Р. Г. Стронгин. – Нижний Новгород, 2003. – 184 с.
10. Лиходед, Н. А. Параллельные последовательности зернистых вычислений / Н. А. Лиходед, А. А. Толстикова // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2010. – Т. 54, № 4. – С. 36–41.
11. Баханович, С. В. Улучшение локальности параллельных алгоритмов численного решения двумерных квазилинейных параболических уравнений / С. В. Баханович, Н. А. Лиходед, П. А. Мандрик // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Сер. Математика. Информатика. Физика. – 2014. – № 2. – С. 211–215.

## References

1. Voevodin V. I., Voevodin V. V. The fortunate locality of supercomputers. *Otkrytye sistemy = Open Systems*, 2013, no. 9, pp. 12–15 (in Russian).
2. Xue J., Cai W. Time-minimal tiling when rise is larger than zero. *Parallel Computing*, 2002, vol. 28, no. 6, pp. 915–939. [https://doi.org/10.1016/s0167-8191\(02\)00098-4](https://doi.org/10.1016/s0167-8191(02)00098-4)
3. Dathathri R., Mullapudi R. T., Bondhugula U. Compiling affine loop nests for a dynamic scheduling runtime on shared and distributed memory. *ACM Transactions on Parallel Computing (TOPC)*, 2016, vol. 3, no. 2, p. 1–28. <https://doi.org/10.1145/2948975>
4. Voevodin V. I., Voevodin V. V. *Parallel Computing*. Saint Petersburg, 2002. 608 p. (in Russian).
5. Adutskevich E. V., Likhoded N. A. A consistent generation of pipeline parallelism and distribution of operations and data among processors. *Programming and Computer Software*, 2006, vol. 32, no. 3, pp. 166–176. <https://doi.org/10.1134/s0361768806030078>
6. Bondhugula U., Baskaran M., Krishnamoorthy S., Ramanujam J., Rountev A., Sadayappan P. Automatic transformations for communication-minimized parallelization and locality optimization in the polyhedral model. *Lecture notes in computer science*, 2008, no. 4959, pp. 132–146. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-78791-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-78791-4_9)
7. Likhoded N. A. Sufficient conditions for the determination and use of data in the same granular parallel computation process. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2014, vol. 54, no. 8, pp. 1316–1326. <https://doi.org/10.1134/s0965542514080077>
8. Likhoded N. A., Paliashchuk M. A. Method of ranking tiles size parameters of parallel algorithm. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2015, vol. 59, no. 4, pp. 25–33 (in Russian).
9. Gergel V. P., Strongin R. G. *Introduction to parallel computing for multiprocessor systems*. Nizhny Novgorod, 2003. 184 p. (in Russian).
10. Likhoded N. A., Tolstikov A. A. Parallel sequences of grain computations. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2010, vol. 54, no. 4, pp. 36–41 (in Russian).
11. Bakhanovich S. V., Likhoded N. A., Mandrik P. A. Improvement of locality of parallel algorithms of the numerical solutions of the two-dimensional quasilinear parabolic equation. *Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science*, 2014, no. 2, pp. 211–215 (in Russian).

## Информация об авторах

*Лиходед Николай Александрович* – д-р физ.-мат. наук, профессор. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [likhoded@bsu.by](mailto:likhoded@bsu.by).

*Толстик Алексей Александрович* – ст. преподаватель. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [tolstikov@bsu.by](mailto:tolstikov@bsu.by).

## Information about the authors

*Likhoded Nikolai A.* – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [likhoded@bsu.by](mailto:likhoded@bsu.by).

*Tolstikov Aliaksei A.* – Senior lecturer. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [tolstikov@bsu.by](mailto:tolstikov@bsu.by).

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

УДК 517.956.3  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-657-662>

Поступило в редакцию 27.10.2020  
Received 27.10.2020

Академик В. И. Корзюк<sup>1</sup>, Я. В. Рудько<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*

### КЛАССИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ СМЕШАННОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОДНОМЕРНОГО ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ С НЕГЛАДКИМ ВТОРЫМ УСЛОВИЕМ КОШИ

**Аннотация.** Изучается классическое решение смешанной задачи в четверти плоскости для одномерного волнового уравнения. На нижнем основании задаются условия Коши, причем второе из них имеет разрыв первого рода в точке. На боковой границе задается гладкое граничное условие. Решение строится методом характеристик в явном аналитическом виде. Доказывается единственность и устанавливаются условия, при которых существует кусочно-гладкое решение. Рассматривается задача с условиями сопряжения.

**Ключевые слова:** одномерное волновое уравнение, неоднородное уравнение, смешанная задача, негладкие начальные условия, метод характеристик

**Для цитирования.** Корзюк, В. И. Классическое решение смешанной задачи для одномерного волнового уравнения с негладким вторым условием Коши / В. И. Корзюк, Я. В. Рудько // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 657–662. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-657-662>

Academician Viktor I. Korzyuk<sup>1</sup>, Jan V. Rudzko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

<sup>2</sup>*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus*

### CLASSICAL SOLUTION OF THE MIXED PROBLEM FOR THE ONE-DIMENSIONAL WAVE EQUATION WITH THE NONSMOOTH SECOND INITIAL CONDITION

**Abstract.** In this article, we study the classical solution of the mixed problem in a quarter of a plane and a half-plane for a one-dimensional wave equation. On the bottom of the boundary, Cauchy conditions are specified, and the second of them has a discontinuity of the first kind at one point. Smooth boundary condition is set at the side boundary. The solution is built using the method of characteristics in an explicit analytical form. Uniqueness is proved and conditions are established under which a piecewise-smooth solution exists. The problem with linking conditions is considered.

**Keywords:** one-dimensional wave equation, nonhomogeneous equation, mixed problem, nonsmooth initial conditions, method of characteristics

**For citation:** Korzyuk V. I., Rudzko J. V. Classical solution of the mixed problem for the one-dimensional wave equation with the nonsmooth second initial condition. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 657–662 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-657-662>

**Введение.** Основное явление в теории механического удара – это распространение волн смещений в твердых телах. Экспериментальное изучение почти всех явлений удара весьма затруднительно. При аналитическом изучении вызванных ударом колебаний интерес представляют задачи, в которых груз после удара остается в соприкосновении с ударяемым телом, в котором рассматриваются и описываются колебательные процессы [1; 2]. Как правило, математическая модель подобных явлений представляет собой смешанные задачи для уравнений в частных производных с присутствием начальных функций, отличных от нуля на множестве нулевой меры [3–5].

Существование классических решений многих задач зависит не только от правильного выбора вида граничных условий для дифференциальных уравнений с частными производными, но и от выполнения условий согласования заданных функций в угловых точках области [4; 5]. Как показано в [6–10], от вида условий согласования зависят гладкость решений и постановка задач.

Как правило, условия согласования являются необходимыми и достаточными при доказательстве существования и единственности решения. Подобные условия согласования возникают при решении задач, для которых задаются граничные условия с помощью негладких функций.

Близкими к изучаемым задачам в данном сообщении в случае гладких функций в граничных условиях для волнового уравнения являются задачи, представленные в [6; 7; 10].

**Постановка задачи.** На замыкании  $\bar{Q} = [0, \infty) \times [0, \infty)$  области  $Q = (0, \infty) \times (0, \infty)$  двух независимых переменных  $(t, x) \in \bar{Q} \subset \mathbb{R}^2$  рассмотрим волновое уравнение

$$\partial_t^2 u - a^2 \partial_x^2 u = f(t, x), \quad (1)$$

где  $a^2$  – положительное действительное число. К уравнению (1) на части границы  $\partial Q$  области  $Q$  присоединяются условия Коши

$$u(0, x) = \varphi(x), x \in [0, \infty), \partial_t u(0, x) = \psi(x) = \begin{cases} \psi_1, & x = 0, \\ \psi_2(x), & x \in (0, \infty), \end{cases} \quad (2)$$

на другой части границы – граничное условие Дирихле

$$u(t, 0) = \mu(t), t \in [0, \infty). \quad (3)$$

Будем полагать, что функции  $f, \varphi, \psi_1, \psi_2, \mu$  достаточно гладкие, а именно:  $f \in C^1(\bar{Q})$ ,  $\varphi \in C^2([0, \infty))$ ,  $\psi_2 \in C^1([0, \infty))$ ,  $\mu \in C^2([0, \infty))$ .

**Построение решения.** Для построения решения задачи (1)–(3) рассмотрим вспомогательную задачу для волнового уравнения (1) на замыкании  $\bar{Q}$  области  $Q$ . К (1) на части границы  $\partial Q$  области  $Q$  присоединяются условия Коши

$$u(0, x) = \varphi(x), x \in [0, \infty), \partial_t u(0, x) = \psi(x) = \begin{cases} \tilde{\psi}_1(x), & x \in [0, x^*), x^* > 0, \\ \tilde{\psi}_2(x), & x \in (x^*, \infty), \end{cases} \quad (4)$$

и граничное условие (3). При этом полагаем, что  $\tilde{\psi}_1 \in C^1([0, x^*])$ ,  $\tilde{\psi}_1 \in C^1([0, x^*))$ ,  $\tilde{\psi}_2(x) = \psi_2(x)$  для  $x \in (x^*, \infty)$ ,  $\tilde{\psi}_1(0) = \psi_1$ .

Как известно, общее решение неоднородного уравнения представляет собой сумму общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного [6; 11]. Пусть  $w: \bar{Q} \rightarrow \mathbb{R}$  – частное решение неоднородного уравнения, удовлетворяющее однородным условиям Коши  $w(0, x) = \partial_t w(0, x) = 0$ ,  $\partial_t^2 w(0, x) = f(0, x)$ . Такое решение  $w$  существует [12]. Если  $f \in C^1(\bar{Q})$ , то  $w \in C^2(\bar{Q})$ .

Тогда общее решение задачи (1), (3), (4) записывается в виде

$$u(t, x) = w(t, x) + g^{(1)}(x - at) + g^{(2)}(x + at), \quad (5)$$

где  $g^{(1)}$  и  $g^{(2)}$  некоторые дважды непрерывно-дифференцируемые функции. Для построения решения разделим область  $Q$  на шесть подобластей

$$\begin{aligned} Q^{(1)} &= Q \cap \{(t, x) \mid x + at < x^*, x - at < x^*, x - at > 0\}, \\ Q^{(2)} &= Q \cap \{(t, x) \mid x + at > x^*, x - at > x^*, x - at > 0\}, \\ Q^{(3)} &= Q \cap \{(t, x) \mid x + at > x^*, x - at < x^*, x - at > 0\}, \\ Q^{(4)} &= Q \cap \{(t, x) \mid x + at < x^*, x - at < x^*, x - at < 0\}, \\ Q^{(5)} &= Q \cap \{(t, x) \mid x + at > x^*, x - at > -x^*, x - at < 0\}, \\ Q^{(6)} &= Q \cap \{(t, x) \mid x - at < -x^*\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Введем функции  $u^{(i)}$  как решения задачи (1), (3), (4) в подобласти  $Q^{(i)}$ ,  $i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ . Обозначим

$$u(t, x) = u^{(i)}(t, x), \text{ если } (t, x) \in Q^{(i)}, i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}. \quad (7)$$

**О п р е д е л е н и е.** Функцию  $u$ , определяемую (7) назовем решением задачи (1), (3), (4), если  $u^{(j)} \in C^2(\overline{Q^{(j)}})$ ,  $j \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ , для каждого  $j \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  функция  $u^{(j)}$  удовлетворяет уравнению (1), функция  $u$  удовлетворяет первому из (4) условию  $u(0, x) = \varphi(x)$ ,  $x \in [0, \infty)$ , и граничному условию (3), функция  $u^{(1)}$  удовлетворяет второму из (4) условию Коши на полуоткрытом отрезке  $[0, x^*)$ , функция  $u^{(2)}$  удовлетворяет этому условию на полупрямой  $(x^*, \infty)$ .

Удовлетворяя условиям Коши в подобластях  $Q^{(1)}$  и  $Q^{(2)}$  получим

$$\begin{aligned} u^{(1)}(t, x) &= w(t, x) + \frac{\varphi(x+at) + \varphi(x-at)}{2} + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{x+at} \tilde{\psi}_1(\xi) d\xi, \quad (t, x) \in Q^{(1)}, \\ u^{(2)}(t, x) &= w(t, x) + \frac{\varphi(x+at) + \varphi(x-at)}{2} + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{x+at} \tilde{\psi}_2(\xi) d\xi, \quad (t, x) \in Q^{(2)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Пользуясь граничным условием в подобластях  $Q^{(4)}$  и  $Q^{(6)}$ , находим выражение для функций  $u^{(3)}$ ,  $u^{(4)}$ ,  $u^{(5)}$  и  $u^{(6)}$ .

$$\begin{aligned} u^{(3)}(t, x) &= w(t, x) + \frac{\varphi(x+at) + \varphi(x-at)}{2} + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{x^*} \tilde{\psi}_1(\xi) d\xi + \frac{1}{2a} \int_{x^*}^{x+at} \tilde{\psi}_2(\xi) d\xi + C, \\ &\quad (t, x) \in Q^{(3)}, \\ u^{(4)}(t, x) &= w(t, x) - w\left(t - \frac{x}{a}, 0\right) + \mu\left(t - \frac{x}{a}\right) + \frac{\varphi(x+at) - \varphi(at-x)}{2} + \\ &\quad + \frac{1}{2a} \int_{at-x}^{at+x} \tilde{\psi}_1(\xi) d\xi, \quad (t, x) \in Q^{(4)}, \\ u^{(5)}(t, x) &= w(t, x) - w\left(t - \frac{x}{a}, 0\right) + \mu\left(t - \frac{x}{a}\right) + \frac{\varphi(x+at) - \varphi(at-x)}{2} - \frac{1}{2a} \int_{x^*}^{at-x} \tilde{\psi}_1(\xi) d\xi + \\ &\quad + \frac{1}{2a} \int_{x^*}^{at+x} \tilde{\psi}_2(\xi) d\xi + C, \quad (t, x) \in Q^{(5)}, \\ u^{(6)}(t, x) &= w(t, x) - w\left(t - \frac{x}{a}, 0\right) + \mu\left(t - \frac{x}{a}\right) + \frac{\varphi(x+at) - \varphi(at-x)}{2} + \frac{1}{2a} \int_{at-x}^{at+x} \tilde{\psi}_2(\xi) d\xi, \\ &\quad (t, x) \in Q^{(6)}. \end{aligned} \quad (9)$$

В (9)  $C$  – некоторая константа. Из [7] приходим к заключению, что  $C = 0$ .

Если  $f \in C^1(\overline{Q})$ ,  $\varphi \in C^2([0, \infty))$ ,  $\tilde{\psi}_1 \in C^1([0, x^*])$ ,  $\tilde{\psi}_2 \in C^1([x^*, \infty))$ ,  $\mu \in C^2([0, \infty))$ , то из (8) и (12) следует, что  $u^{(j)} \in C^2(\overline{Q^{(j)}})$ ,  $j \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ .

**Т е о р е м а 1.** Если выполняются условия гладкости для заданных функций:  $f \in C^1(\overline{Q})$ ,  $\varphi \in C^2([0, \infty))$ ,  $\tilde{\psi}_1 \in C^1([0, x^*])$ ,  $\tilde{\psi}_2 \in C^1([x^*, \infty))$ ,  $\mu \in C^2([0, \infty))$ , то существует единственное классическое решение задачи (1), (3), (4) в смысле определения 1, и оно представляется формулами (8) и (9).

**Д о к а з а т е л ь с т в о** следует из (8) и (9). Непосредственной проверкой убеждаемся, что функции удовлетворяют уравнению (1) и условиям (3), (4). Единственность доказывается методом от противного. Если предположить, что существует два решения. Тогда для их разности получаем однородное уравнение (1) и однородные условия (3), (4), из которых следует нулевое решение согласно (8) и (9).

**Т е о р е м а 2.** Пусть выполняются условия  $f \in C^1(\overline{Q})$ ,  $\varphi \in C^2([0, \infty))$ ,  $\tilde{\psi}_1 \in C^1([0, x^*])$ ,  $\tilde{\psi}_2 \in C^1([x^*, \infty))$ ,  $\mu \in C^2([0, \infty))$ . Тогда решение задачи (1), (3), (4) в смысле определения, которое представлено формулами (8) и (9), принадлежит классу  $C(\overline{Q})$ , тогда и только тогда, когда  $\mu(0) = \varphi(0)$ .

**Т е о р е м а 3.** Пусть выполняются условия  $f \in C^1(\bar{Q})$ ,  $\varphi \in C^2([0, \infty))$ ,  $\tilde{\psi}_1 \in C^1([0, x^*])$ ,  $\tilde{\psi}_2 \in C^1([x^*, \infty))$ ,  $\mu \in C^2([0, \infty))$ . Тогда решение задачи (1), (3), (4) в смысле определения, которое представлено формулами (8) и (9), принадлежит классу  $C^1(Q)$ , тогда и только тогда, когда  $\tilde{\psi}'_1(x^*) = \tilde{\psi}'_2(x^*)$ ,  $\mu'(0) = \psi(0)$  и  $\mu(0) = \varphi(0)$ .

**Т е о р е м а 4.** Пусть выполняются условия  $f \in C^1(\bar{Q})$ ,  $\varphi \in C^2([0, \infty))$ ,  $\tilde{\psi}_1 \in C^1([0, x^*])$ ,  $\tilde{\psi}_2 \in C^1([x^*, \infty))$ ,  $\mu \in C^2([0, \infty))$ . Тогда решение задачи (1), (3), (4) в смысле определения, которое представлено формулами (8) и (9), принадлежит классу  $C^2(\bar{Q})$ , тогда и только тогда, когда  $\tilde{\psi}'_1(x^*) = \tilde{\psi}'_2(x^*)$ ,  $\tilde{\psi}_1(x^*) = \tilde{\psi}_2(x^*)$ ,  $\mu''(0) = a^2\varphi''(0) + f(0, 0)$ ,  $\mu'(0) = \psi(0)$  и  $\mu(0) = \varphi(0)$ .

Доказательство теорем 2–4 проводится методом характеристик аналогично доказательствам, приведенным в [13–15].

Возвращаемся к исходной задаче (1)–(3). Ее решение может быть получено предельным переходом из решения задачи (1), (3), (4). Устремив  $x^*$  к нулю, получим, что области  $Q^{(1)}$ ,  $Q^{(3)}$ ,  $Q^{(4)}$  и  $Q^{(5)}$  уменьшаются и в пределе становятся пустыми множествами, но их значения будут влиять на значения решения на характеристике  $x - at = 0$ , поскольку замыкание множеств  $Q^{(3)}$  и  $Q^{(5)}$  станет характеристикой  $x - at = 0$ , а замыкание  $Q^{(1)}$  и  $Q^{(4)}$  станет точкой  $(0, 0)$ . В то же время области  $Q^{(2)}$  и  $Q^{(6)}$  останутся, и решение будет иметь вид

$$u(t, x) = \begin{cases} u^{(2)}(t, x), & x - at > 0, \\ [u^{(3)} \text{ или } u^{(5)}](t, x), & x - at = 0, \\ u^{(6)}(t, x), & x - at < 0, \end{cases} \quad (10)$$

где функции  $u^{(2)}$ ,  $u^{(3)}$ ,  $u^{(5)}$  и  $u^{(6)}$  определены формулами (8) и (9) при  $x^* = 0$ .

Для корректности предельного перехода необходимо, чтобы кусочно-заданная функция  $u$  была дважды непрерывно-дифференцируемой в  $Q^{(i)}$ , для каждого  $i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ . Это будет выполняться, если будут выполняться условия гладкости:  $f \in C^1(\bar{Q})$ ,  $\varphi \in C^2([0, \infty))$ ,  $\tilde{\psi}_1 \in C^1([0, x^*])$ ,  $\tilde{\psi}_2 \in C^1([x^*, \infty))$ ,  $\mu \in C^2([0, \infty))$ . Для единственности решения необходимы равенства функций  $u^{(3)}$  и  $u^{(5)}$ , а также их частных производных до второго порядка включительно, на характеристике  $x - at = 0$ , что будет выполнено при выполнении условий  $\mu''(0) = a^2\varphi''(0) + f(0, 0)$ ,  $\mu'(0) = \tilde{\psi}'_1(0)$  и  $\mu(0) = \varphi(0)$ .

Такое решение  $u$  будет принадлежать классу  $C(\bar{Q}) \cap C^2(Q_-) \cap C^2(Q_+) \cap C^2(Q_0)$ , где

$$\begin{aligned} Q_- &= \{(t, x) | t > 0, x > 0, x - at > 0\}, \\ Q_+ &= \{(t, x) | t > 0, x > 0, x - at < 0\}, \\ Q_0 &= \{(t, x) | t > 0, x > 0, x - at = 0\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Сформулируем результат в виде теоремы.

**Т е о р е м а 5.** Пусть выполняются условия  $f \in C^1(\bar{Q})$ ,  $\varphi \in C^2([0, \infty))$ ,  $\psi_2 \in C^1([0, \infty))$ ,  $\mu \in C^2([0, \infty))$ , тогда решение задачи (1)–(3) в смысле определения при  $x^* = 0$ , представленное (10), является единственным тогда и только тогда, когда выполняются условия согласования  $\mu''(0) = a^2\varphi''(0) + f(0, 0)$ ,  $\mu'(0) = \psi_2$  и  $\mu(0) = \varphi(0)$ . Кроме того, оно принадлежит классу  $C(\bar{Q}) \cap C^2(Q_-) \cap C^2(Q_+) \cap C^2(Q_0)$ .

Доказательство следует из рассуждений выше.

**Заключение.** Были сформулированы условия согласования, при выполнении которых существует классическое решение задачи в случае достаточной гладкости условий Коши. Построены классические решения задачи Коши в полуплоскости двух независимых переменных и смешанной задачи в четверти плоскости двух независимых переменных, и показана зависимость от гладкости условий Коши. Одним из важнейших результатов является рассмотрение задачи, когда одна функция из условий Коши задается на множестве нулевой меры. В этом случае были получены не только условия существования решения, а доказаны необходимые и достаточные условия для единственности решения.

## Список использованных источников

1. Лазарян, В. А. О динамических усилиях в упряжных приборах однородных поездов при сопротивлениях относительно перемещениям экипажей / В. А. Лазарян // Тр. Днепропетр. ин-та инженеров ж.-д. транспорта. – 1950. – Вып. 20. – С. 3–32.
2. Маврин, А. И. К теории ударного погружения свай / А. И. Маврин // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1967. – № 8. – С. 24–28.
3. Boussinesq, J. Du choc longitudinal d'une barre élastique prismatique fixée à un bout et heurtée à l'autre / J. Boussinesq // Comptes Rendus. – 1883. – Vol. 97, N 2. – P. 154–157.
4. Гайдук, С. И. О некоторых задачах, связанных с теорией поперечного удара по стержням / С. И. Гайдук // Дифференц. уравнения. – 1977. – Т. 13, № 7. – С. 1233–1243.
5. Гайдук, С. И. О единственности решения одной задачи из волновой теории механического удара / С. И. Гайдук, Г. М. Заяц // Дифференц. уравнения. – 1989. – Т. 25, № 5. – С. 833–839.
6. Корзюк, В. И. Уравнения математической физики: учеб. пособие / В. И. Корзюк. – Минск, 2011. – 509 с.
7. Корзюк, В. И. Классическое решение смешанных задач для одномерного волнового уравнения с негладкими условиями Коши / В. И. Корзюк, С. И. Пузырный // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2016. – № 2. – С. 22–31.
8. Корзюк, В. И. Об условиях согласования в граничных задачах для гиперболических уравнений / В. И. Корзюк, И. С. Козловская // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2013. – Т. 57, № 5. – С. 37–42.
9. Корзюк, В. И. Классическое решение первой смешанной задачи одномерного волнового уравнения с условиями типа Коши / В. И. Корзюк, И. С. Козловская, С. Н. Наумовец // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2015. – № 1. – С. 7–21.
10. Корзюк, В. И. Решение задачи Коши для гиперболического уравнения с постоянными коэффициентами в случае двух независимых переменных / В. И. Корзюк, И. С. Козловская // Дифференц. уравнения. – 2012. – Т. 48, № 5. – С. 700–709.
11. Корзюк, В. И. Классические решения задач для гиперболических уравнений: Курс лекций в 10 ч. / В. И. Корзюк, И. С. Козловская. – Минск, 2017. – Ч. 2. – 52 с.
12. Корзюк, В. И. Классическое решение в четверти плоскости смешанной задачи для волнового уравнения / В. И. Корзюк, И. С. Козловская, В. Ю. Соколович // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 647–651. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-647-651>
13. Столярчук, И. И. Решение смешанных задач методом характеристик для волнового уравнения с интегральным условием / И. И. Столярчук // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2017. – № 1. – С. 53–62.
14. Корзюк, В. И. Классическое решение смешанной задачи для уравнения типа Клейна–Гордона–Фока в полуплоскости с косыми производными в граничных условиях / В. И. Корзюк, И. И. Столярчук // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2018. – Т. 54, № 4. – С. 391–403. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-4-391-403>
15. Корзюк, В. И. Смешанная задача для одномерного гиперболического уравнения четвертого порядка с периодическими условиями / В. И. Корзюк, Нгуен Ван Винь // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 135–148. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-2-135-148>

## References

1. Lazaryan V. A. On dynamic forces in harness devices of homogeneous trains with resistance to relative movements of carriages. *Trudy Dnepropetrovskogo instituta inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta* [Proceedings of the Dnepropetrovsk Institute of Railway Engineers], 1950, no. 20, pp. 3–32 (in Russian).
2. Mavrin A. I. To the theory of shock piling. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura* [News of universities. Building and architecture], 1967, no. 8, pp. 24–28 (in Russian).
3. Boussinesq J. Du choc longitudinal d'une barre élastique prismatique fixée à un bout et heurtée à l'autre. *Comptes Rendus*, 1883, vol. 97, no. 2, pp. 154–157 (in French).
4. Gayduk S. I. On some problems related to the theory of transverse impact on rods. *Differentsial'nye uravneniya = Differential Equations*, 1977, vol. 13, no. 7, pp. 1233–1243 (in Russian).
5. Gayduk S. I., Zayats G. M. On the uniqueness of the solution of one problem from the wave theory of mechanical shock. *Differentsial'nye uravneniya = Differential Equations*, 1989, vol. 25, no. 5, pp. 592–597.
6. Korzyuk V. I. *Equations of mathematical physics*. Minsk, 2011. 509 p. (in Russian).
7. Korzyuk V. I., Puzyrnyi S. I. Classical solution of mixed problems for a one-dimensional wave equation with Cauchy nonsmooth conditions. *Vesti Natsyional'nai akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2016, no. 2, pp. 22–31 (in Russian).
8. Korzyuk V. I., Kozlovskaya I. S. Fitting conditions in the boundary problems for hyperbolic equations. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2013, vol. 57, no. 5, pp. 37–42 (in Russian).
9. Korzyuk V. I., Kozlovskaya I. S., Naumavets S. N. Classical solution to the first mixed problem for the one-dimensional wave equation with Cauchy-type conditions. *Vesti Natsyional'nai akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2015, no. 1, pp. 7–21 (in Russian).

10. Korzyuk V. I., Kozlovskaya I. S. Solution of the Cauchy problem for a hyperbolic equation with constant coefficients in the case of two independent variables. *Differential Equations*, 2012, vol. 48, no. 5, pp. 707–716. <https://doi.org/10.1134/s0012266112050096>

11. Korzyuk V. I., Kozlovskaya I. S. *Classical problem solutions for hyperbolic equations: A course of lectures in 10 parts*. Minsk, 2017, part 2. 52 p. (in Russian).

12. Korzyuk V. I., Kozlovskaya I. S., Sokolovich V. Yu. Classical solution of the mixed problem in the quarter of the plane for the wave equation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 647–651 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-647-651>

13. Stolyarchuk I. I. Solution of the mixed problems by the method of characteristics for the wave equation with the integral condition. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2017, no. 1, pp. 53–62 (in Russian).

14. Korzyuk V. I., Stolyarchuk I. I. Classical solution of the mixed problem for the Klein–Gordon–Fock type equation in the half-strip with curve derivatives at boundary conditions. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 391–403 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-4-391-403>

15. Korzyuk V. I., Nguyen Van Vinh. A mixed problem for the four-order one-dimensional hyperbolic equation with periodic conditions. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 135–148 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-2-135-148>

### Информация об авторах

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

Рудько Ян Вячеславович – магистрант. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: janycz@yahoo.com.

### Information about the authors

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

Rudzko Jan V. – Master student. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: janycz@yahoo.com.

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

**ФИЗИКА**  
**PHYSICS**

УДК 535.23:621.374.825  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-663-669>

Поступило в редакцию 12.06.2020  
Received 12.06.2020

**Е. В. Тимошенко, В. А. Юревич**

*Могилевский государственный университет им. А. Кулешова, Могилев, Республика Беларусь*

**ФОРМАЛИЗМ ВЕКТОРА БЛОХА В ЗАДАЧЕ О НЕЛИНЕЙНОМ РЕЗОНАНСНОМ  
ОТКЛИКЕ КВАЗИДВУМЕРНОГО СУПЕРКРИСТАЛЛА**

*(Представлено членом-корреспондентом В. П. Редько)*

**Аннотация.** С учетом представлений обобщенной двухуровневой схемы в рамках полуклассического подхода к рассмотрению резонансного взаимодействия светового поля с веществом получено аналитическое решение задачи об эволюции сверхизлучения в квазидвумерном суперкристалле, образованном квантовыми точками. Расчет проведен для физических параметров полупроводниковой структуры с квантоворазмерными эффектами при наличии резонансной нелинейности и внутризонной релаксации.

**Ключевые слова:** нелинейная динамика, резонансная оптика, коллективные эффекты излучения, суперкристаллы квантовых точек, диполь-дипольное взаимодействие

**Для цитирования.** Тимошенко, Е. В. Формализм вектора Блоха в задаче о нелинейном резонансном отклике квазидвумерного суперкристалла / Е. В. Тимошенко, В. А. Юревич // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 663–669. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-663-669>

**Elena V. Timoshchenko, Vladimir A. Yurevich**

*Mogilev State A. Kuleshov University, Mogilev, Republic of Belarus*

**BLOCH VECTOR FORMALISM IN THE PROBLEM OF NONLINEAR RESONANT RESPONSE  
OF A QUASI-TWO-DIMENSIONAL SUPERCRYSTAL**

*(Communicated by Corresponding Member Vsevolod P. Red'ko)*

**Abstract.** Taking into account the ideas of the generalized two-level scheme, within the framework of the semiclassical approach to the consideration of the resonant interaction of the light field with matter, an analytical solution to the problem of the evolution of superradiance in a quasi-two-dimensional supercrystal formed by quantum dots is obtained. The calculation was carried out for the physical parameters of a semiconductor structure with quantum-well effects in the presence of resonant nonlinearity and intraband relaxation.

**Keywords:** nonlinear dynamics, resonant optics, collective effects of radiation, quantum dots supercrystals, dipole-dipole interaction

**For citation:** Timoshchenko E. V., Yurevich V. A. Bloch vector formalism in the problem of nonlinear resonant response of a quasi-two-dimensional supercrystal. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 663–669 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-663-669>

**Введение.** В настоящее время интенсивно разрабатываются искусственные электромагнитные композитные среды с оптическими свойствами, отсутствующими у составляющих их исходных природных материалов. Эти заранее неочевидные оптические или, в более широком частотном диапазоне, электромагнитные свойства обусловлены субволновым размером элементарных дипольных излучателей при их плотной упаковке в среде и резонансным характером рассеяния внешнего электромагнитного излучения. Установлено, что двумерные суперкристаллы

из регулярно расположенных дипольных центров (в частности, квантовых точек) представляют собой один из примеров таких объектов, оптические свойства которых могут контролироваться изменением формы и химического состава образующих элементов, а также геометрией их структуры [1]. К подобным объектам относят и метаматериалы – также новый класс веществ, не существующих в природе [2]. Внутреннюю структуру многих квазикристаллов, среди которых ди-халькогениды переходных металлов (например,  $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WSe}_2$ ) [3], суперкристаллы полупроводниковых квантовых точек [4; 5], фосфорены [6] и органические полимеры [7] можно представить упорядоченным ансамблем квантовых точек (мета-атомов – образований, превышающих обычный размер атома, например, экситонов) с дискретными свойствами энергетического спектра.

В силу существования дополнительных степеней свободы в схеме резонансного взаимодействия с когерентным излучением (например, геометрии решетки и взаимодействия представляемых диполями квантовых точек) суперкристаллы, обладая наноразмерной толщиной, характеризуются уникальными транспортными и оптическими свойствами. Суперкристалл может практически полностью отразить световое поле в определенном спектральном диапазоне, т. е. является идеальным критичным по частоте зеркалом нанометровой толщины [8]. В дополнение к этому, его отражательная способность нелинейна и обнаруживает бистабильное поведение, т. е. возможно переключение отражения незначительным изменением интенсивности внешнего сигнала от конечной величины к режиму практически полной прозрачности. Определенное достоинство двумерных суперкристаллов выражено тем, что в подавляющем большинстве их материалы – полупроводники, энергетическая структура которых способна управляться внешним воздействием – это делает их в высшей степени перспективными в применении в устройствах нанофотоники. Квантовые переходы с участием экситонов характеризуются гигантскими силами осциллятора, что приводит к более яркому проявлению нелинейных оптических эффектов при умеренных уровнях интенсивности действующего в среде суперкристалла когерентного излучения. Подобные материалы характеризуются также относительно высокой концентрацией активных дипольных центров (их относят к плотным резонансным средам), при этом вероятно особая эффективность взаимного влияния собственных электрических полей. Поэтому изучение закономерностей нелинейной динамики резонансного отклика образованных квантовыми точками суперкристаллов представляется актуальным и целесообразным с практической позиции.

**Постановка задачи и основные уравнения.** В настоящей работе поставлена задача эволюции вынужденного излучения в структуре низкоразмерного суперкристалла при условии, что характерная длительность формируемых импульсов значительно меньше времени действия релаксационных механизмов в среде. При этом условии взаимодействие среды и светового поля когерентно (т. е. оказываются согласованными осцилляции поляризованности ансамбля активных центров и порождаемого им резонансного волнового поля с частотой  $\omega$ , совпадающей с частотой центра спектральной линии), и один из обусловленных этой корреляцией коллективных эффектов представлен сверхизлучением [9]. Испускание импульса сверхизлучения (СИ) ансамблем из большого числа  $N$  инвертированных активных центров со средним дипольным моментом  $\mu$  способно развиваться в течение времени  $\tau_r = \epsilon_0 \hbar c / \mu^2 N l \omega$  ( $l$  – толщина слоя), много меньшего характерного времени излучения изолированного атома  $T_1$ . Явление сверхизлучения происходит как следствие самопроизвольной фазовой корреляции (согласования фаз или фазировки) первоначально независимых активных центров, образующих суперкристалл. Появление фазовой корреляции объясняют двумя факторами – взаимодействием диполей через излучаемое ими электромагнитное поле и нелинейностью осцилляторных движений электронов внутри активных центров. Полупроводниковые структуры с квантоворазмерными эффектами используются как инверсные среды; в виде планарных слоев эти материалы применяются в качестве активных поверхностных пленок, способных модулировать резонансное излучение. В полупроводниковых средах СИ развивается как коллективная спонтанная рекомбинация [10]. В процессе формирования импульса СИ фазы отдельных экситонов, представляемых диполями, спонтанно синхронизируются, в результате чего в пределах суперкристалла формируется коллективный диполь с малым временем излучательной рекомбинации. Влиянием диполь-дипольного взаимодействия и реакцией на поле переходов, близких к основному, по мере резонансных вариаций населенно-

сти определяется смещение центра спектральной линии усиления и автомодуляционный дрейф частоты высвечиваемого поля. Этими особенностями, присущими резонансному взаимодействию ввиду относительно плотной упаковки активных центров в структуре суперкристалла и высоких значений дипольных моментов, может определяться самодефазировка ансамбля элементарных излучателей в ходе формирования импульса СИ.

В настоящей работе учтено влияние этих факторов нелинейной фазовой динамики на процесс сверхизлучения в квазидвумерном суперкристалле из квантовых точек. Фазовыми эффектами определена возможность возникновения динамической обратной связи, поэтому применительно к подобным низкоразмерным усиливающим элементам следует говорить именно о генерации с характерностью процесса СИ.

Квантоворазмерные структуры обладают свойствами материалов, образуемых активными центрами, реакция которых на электромагнитное поле излучения носит выражено дипольный характер. Поэтому к их расчетному анализу применимы представления двухуровневой схемы взаимодействия вещества с резонансным световым полем. Оптическое плосковолновое поле в слое суперкристалла, естественно, предполагается однородным в направлении его толщины  $l$ . В отличие от уже решенных аналитических задач по тематике СИ, в полученном решении наряду с фазовой релаксацией элементарных диполей учтено поляризующее влияние на диэлектрическую восприимчивость вещества ближних полей диполей в рамках представления действующего поля, включающего локальную поправку Лоренца. Такого рода нелинейный механизм взаимодействия среды и поля, приводящий к малоинерционному смещению спектральной линии, типичен именно для сред с относительно высокой плотностью активных центров [11]. Обобщение двухуровневой схемы в рассматриваемой далее задаче состоит в учете влияния на поляризуемость поглощения в квазирезонансных переходах. Обычно это выражено допущением различия (дефекта  $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ ) поляризуемостей дипольных частиц  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  в основном и возбужденном состоянии. При перераспределении частиц по уровням перехода в ходе вынужденного излучения возможны нелинейные резонансные вариации преломления, что также существенно в полупроводниковых экситонных средах.

Задача об энергообмене среды суперкристалла и светового поля в процессе СИ может быть решена в допущении сверхтонкого граничного слоя резонансного материала, в сущности, для планарной пленки, излучающей с поверхности. При этом вместо волновых уравнений допускается использование граничных электродинамических условий в уравнениях Максвелла, записанных для действующего на атомы и отраженного слоем плосковолновых полей. Соотношения для условий содержат компоненты, учитывающие резонансную поляризацию в граничном слое, которые именуют сверхизлучательными [12], этими компонентами выражена связь действующего поля и резонансного отклика среды. Совместно с граничными соотношениями для световых полей принято рассматривать уравнения квантовомеханической двухуровневой матрицы плотности для вероятностных переменных резонансной поляризованности  $\rho$  и инверсной населенности  $n$ . Изменением сверхизлучательных компонентов принято характеризовать эволюцию поля в таких объектах, как квазидвумерные суперкристаллы [13], их величиной определяется динамика напряженности излучаемого поля  $E(t)$  [12; 13].

Квазистационарное приближение в схеме расчета с граничными соотношениями для системы Максвелла аналогично [14] приводит к модификации вытекающих из квантовомеханических уравнений оптических уравнений Блоха для материальных переменных резонансного отклика среды (амплитуды поляризованности  $\rho_m(t)$  и инверсии  $n(t)$ ) и амплитуды нормированного излучаемого поля  $e(t) = \mu T_2 E(t) / \hbar$ :

$$T_2 \frac{d\rho_m}{dt} = \left\{ \frac{\kappa n}{[1 - \beta\gamma(1-n)]^2 + \beta^2(1-n)^2} - 1 \right\} \rho_m + i \frac{\kappa n [\gamma - \beta(1 + \gamma^2)(1-n)]}{[1 - \beta\gamma(1-n)]^2 + \beta^2(1-n)^2} \rho_m, \quad (1)$$

$$T_2 \frac{dn}{dt} = - \frac{\kappa |\rho_m|^2}{[1 - \beta\gamma(1-n)]^2 + \beta^2(1-n)^2}, \quad e(t) = \frac{\kappa \rho_m}{1 - \beta(\gamma - i)(1-n)},$$

где  $T_2$  – время фазовой (поперечной или внутризонной) релаксации, характеризующее спектральную ширину линии усиления;  $\kappa$  – показатель усиления слоя, характеризующий уровень ненасы-

щенного усиления (иногда его называют также параметром резонансной нелинейности поглощения (усиления)), для оценки величины этого параметра считается верным соотношение  $\kappa = T_2 / \tau_R$  [9];  $\gamma$  – нормировочный коэффициент в составляющей фазовой отстройке, возникающей при учете локальной поправки Лоренца. В компоненте фазовой отстройки, обусловленной дефектом поляризуемостей, коэффициентом  $\beta = 2\pi\Delta\alpha Nl\omega / c$  характеризуется нелинейный дрейф частоты поля, который пропорционален резонансной вариации инверсии. Компонент, описывающий это следствие резонансной нелинейности, в отличие от [14], учитывается в представлении локальной поправки Лоренца.

**Решение задачи для координат вектора Блоха.** Динамика компонентов отклика среды суперкристалла определяет процесс усиления при достижении некоторой пороговой инверсии  $n(t=0) = n_0$ . Далее аналогично [9] предположим, что при «старте» СИ представляющий его дипольный ансамбль максимально инвертирован. Допустим, таким образом, что в начальный момент  $n(t=0) = 1$ , и корреляции в ансамбле отсутствуют –  $\rho_m(t=0) = 0$ .

Преобразуем далее систему (1), записав ее для квадрата модуля амплитуды поляризованности  $|\rho_m(t)|^2$  и инверсии, т. е. в схеме расчета перейдем к действительным переменным:

$$\begin{aligned} T_2 \frac{d|\rho_m|^2}{dt} &= 2 \left\{ \frac{\kappa n}{[1 - \beta\gamma(1-n)]^2 + \beta^2(1-n)^2} - 1 \right\} |\rho_m|^2, \\ T_2 \frac{dn}{dt} &= - \frac{\kappa |\rho_m|^2}{[1 - \beta\gamma(1-n)]^2 + \beta^2(1-n)^2}, \quad u(t) = \frac{\kappa^2 |\rho_m|^2}{[1 - \beta\gamma(1-n)]^2 + \beta^2(1-n)^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Не имеющая размерности плотность поля СИ  $u(t)$  – в системе (2) определяется сверхизлучательной составляющей резонансной поляризованности – пропорциональна квадрату модуля амплитуды поляризованности.

Интеграл системы (2) определяется элементарно из уравнения

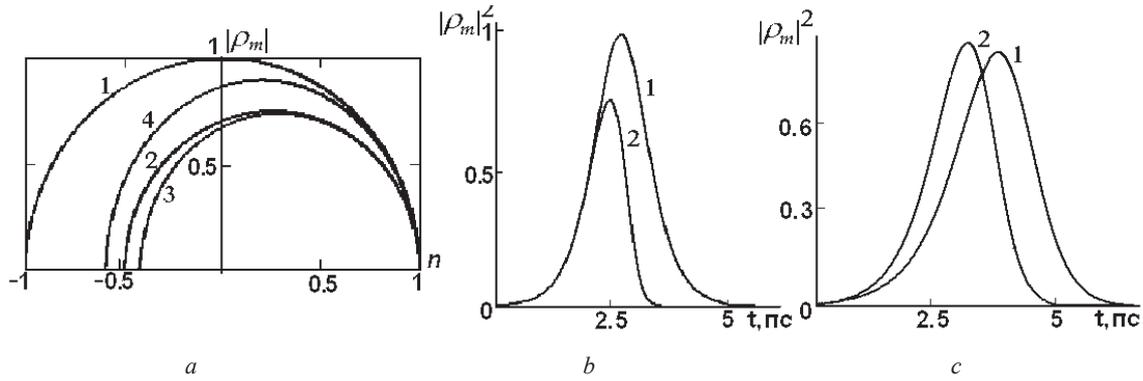
$$\frac{\kappa}{2} \frac{d|\rho_m|^2}{dn} = [1 - \beta\gamma(1-n)]^2 + \beta^2(1-n)^2 - \kappa n,$$

и можно установить, что решения (2) для  $|\rho_m(t)|^2$  и  $n$  с учетом принятых выше начальных условий удовлетворяют такому соотношению:

$$|\rho_m|^2 + n^2 = 1 - \frac{2}{\kappa}(1-n) + \frac{2}{\kappa}\beta(1-n)^2 \left[ \gamma - \frac{\beta}{3}(1+\gamma^2)(1-n) \right]. \quad (3)$$

В литературе, посвященной теоретическому анализу коллективных эффектов, считается удобным использовать формализм вектора Блоха. Переменные уравнений, подобных схеме расчета (1), тогда рассматриваются в виде координат (составляющих) вектора Блоха:  $X = \text{Re}\rho_m$ ,  $Y = \text{Im}\rho_m$ ,  $Z = n$ . В отсутствие эффектов, вызывающих нелинейную отстройку частоты («классический» случай – для протяженной среды), формулируется соотношение  $|\rho_m|^2 + n^2 = 1$ , известное как закон сохранения полярного угла вектора Блоха [9]. Отметим, что выражением (3) представлен, в сущности, аналог закона сохранения полярного угла вектора Блоха для более общего случая взаимодействия. Наряду с фазовой нелинейностью при формулировке (3) учитывается скорость разброса диполей в пределах ширины спектральной линии (т. е. конечность времени фазовой релаксации диполей). Общность формулировки (3), однако, ограничена предположением об однородном поле в суперкристалле.

**Результаты расчетов.** В выборе параметров, определяющих величины коэффициентов (1) для полупроводниковых квантоворазмерных структур, в основном, ориентировались по данным, известным, например, из [5; 10]. Примерный масштаб явлений соответствовал интенсивности порядка  $(1-5)10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, концентрации активных центров  $N \sim (2-4)10^{18}$  см<sup>-3</sup>, длине волны оптического поля  $\sim 1,3 \cdot 10^{-6}$  м. На рисунке *a* иллюстрируются характерные траектории в фазовой плоскости переменных  $(|\rho_m|, n)$ , рассчитанные, следуя соотношению (3), для разных вариантов взаимодействия.



Форма фазовых траекторий в плоскости  $(|\rho_m|, n)$  (a) и примеры расчета временной развертки квадрата модуля поляризованности (b, c);  $\beta = 0$  (кривые 1, 2), 0,05 (3, 4),  $\kappa = 1,2$  (1–3),  $\gamma = 3,17$  (4) (a);  $\beta = 0$  (1), 0,1 (2),  $\kappa = 1,2$  (2) (b);  $\kappa = 1,1$  (1), 1,25 (2),  $\beta = 0,1$ ,  $\gamma = 3,17$  (c),  $T_2 = 1,0 \cdot 10^{-12}$  c

The shape of phase trajectories in the  $(|\rho_m|, n)$  plane (a) and examples of calculating the temporal dependence of the polarization square modulus (b, c);  $\beta = 0$  (curves 1, 2), 0,05 (3, 4),  $\kappa = 1,2$  (1–3),  $\gamma = 3,17$  (4) (a);  $\beta = 0$  (1), 0,1 (2),  $\kappa = 1,2$  (2) (b);  $\kappa = 1,1$  (1), 1,25 (2),  $\beta = 0,1$ ,  $\gamma = 3,17$  (c),  $T_2 = 1,0 \cdot 10^{-12}$  c

Закону сохранения вектора Блоха в традиционной формулировке соответствует траектория, описываемая кривой 1 на рисунке a. Естественно, траектория имеет форму полуокружности, такую же форму имеет кривая 2, соответствующая только учету фазовой релаксации. В этом варианте, однако, разность населенности в отрицательной части значений имеет меньшее по модулю значение – сброс инверсии в условиях дефазировки диполей, вызванной влиянием спонтанных процессов взаимодействия со средой, происходит не до максимального ( $n_{\text{мин}} = -1$ ) уровня. В этой мере неполный сброс инверсии ведет и к снижению мощности импульса СИ ( $|\rho_m|^2 < 1$ ). Влияние фазового эффекта, связанного с дефазировкой диполей из-за различия поляризуемостей ( $\beta \neq 0$ ), приводит к деформации траектории, описывающей закон сохранения (кривая 3) – в таком случае траектория принимает форму полуэллипса.

Фронты импульсов должны развиваться в условиях различного темпа изменения инверсии, поэтому формируемые «нелинейные» импульсы СИ становятся асимметричными. Еще большим различием фронтов должны характеризоваться импульсы СИ в случае возможности диполь-дипольного взаимодействия (кривая 4). Обусловившая асимметрию нелинейная дефазировка образующих суперкристалл элементарных излучателей тогда может происходить при одновременном действии двух автомодуляционных механизмов с частичной взаимной компенсацией.

Использование соотношения (3) дает возможность точного аналитического расчета временной развертки импульса СИ с учетом фазовой релаксации и фазовых нелинейностей. Из соотношения (3) следует выражение для  $|\rho_m|^2$ :

$$|\rho_m|^2 = (1 - n) \left\{ 1 + n - \frac{2}{\kappa} + \frac{2}{\kappa} \beta (1 - n) \left[ \gamma - \frac{\beta}{3} (1 + \gamma^2) (1 - n) \right] \right\}. \quad (4)$$

С учетом (4) уравнение для инверсии из системы (2) разрешимо в виде соотношения

$$2(\kappa - 1)(t - t_0) / T_2 = \ln(1 - n) + (3\kappa - 4) \ln \left\{ 1 + n - \frac{2}{\kappa} + \frac{2}{\kappa} \beta (1 - n) \left[ \gamma - \frac{\beta}{3} (1 + \gamma^2) (1 - n) \right] \right\} + \frac{(3\kappa - 4 + 2\beta\gamma)}{\sqrt{D}} \operatorname{Arth} \frac{\beta^2 (1 + \gamma^2) (1 - n) + 3(\kappa - 2\beta\gamma)}{\sqrt{D}}, \quad D = (\kappa - 2\beta\gamma)^2 + 16\beta^2 (\kappa - 1) (1 + \gamma^2) / 3. \quad (5)$$

Решение (5) допускает параметрический расчет – величина  $n$  используется тогда в качестве аргумента, линейно нарастающего в пределах диапазона его изменений, который определяется неотрицательными значениями выражения (4). Примеры расчетной оценки временной зависимости переменной  $|\rho_m(t)|^2$ , в основном, определяющей форму импульса СИ, с использованием выра-

жений (5) проиллюстрированы на рисунке *b* и *c*. Отмечается асимметрия импульсов, возрастающая в случае относительной значимости вкладов механизмов нелинейности – существования различия поляризуемостей на уровнях основного перехода (рисунок *b*), нарастания показателя усиления  $k$  (рисунок *c*). В расчетах предполагалось, что последнее должно происходить за счет увеличения концентрации активных центров  $N$ .

**Заключение.** В литературе предсказывалась возможность возникновения самовозбуждения генерации в тонких планарных инверсных слоях [15]. Режим самовозбуждения, который может реализоваться в форме сверхизлучения при рассмотренных условиях инверсии в суперкристалле, образованном квантовыми точками, представляется перспективным к использованию для получения импульсной генерации в лазерных устройствах, где усиливающий элемент представляет собой тонкий слой резонансной среды с относительно большой концентрацией активных центров при достижении высокого уровня инверсии. Проведенные оригинальные расчетные оценки временного хода процесса СИ с учетом типичных для резонансного отклика нелинейностей могут быть использованы при разработке методик получения и профилирования оптических импульсов в субпикосекундном диапазоне длительностей в современных устройствах нанофотоники.

### Список использованных источников

1. Alù, A. Prime time / A. Alù // *Nature Materials*. – 2016. – Vol. 15, N 12. – P. 1229–1231. <https://doi.org/10.1038/nmat4814>
2. Soukoulis, C. M. Optical Metamaterials – More Bulky and Less Lossy / C. M. Soukoulis, M. Wegener // *Science*. – 2010. – Vol. 330, N 6011. – P. 1633–1634. <https://doi.org/10.1126/science.1198858>
3. 2D transition metal dichalcogenides / S. Manzeli [et al.] // *Nature Review Materials*. – 2017. – Vol. 2, N 8. – Art. 17033. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.33>
4. Long-range orientation and atomic attachment of nanocrystals in 2D honeycomb superlattices / M. P. Boneschanscher [et al.] // *Science*. – 2014. – Vol. 344, N 6190. – P. 1377–1380. <https://doi.org/10.1126/science.1252642>
5. Low-Dimensional Semiconductor Superlattices Formed by Geometric Control over Nanocrystal Attachment / W. H. Evers [et al.] // *Nano Letters*. – 2013. – Vol. 13, N 6. – P. 2317–2323. <https://doi.org/10.1021/nl303322k>
6. Black phosphorus field-effect transistors / L. Li [at al.] // *Nature Nanotechnology*. – 2014. – Vol. 9, N 5. – P. 372–377. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.35>
7. A two-dimensional conjugated aromatic polymer via C–C coupling reaction / W. Liu [et al.] // *Nature Chemistry*. – 2017. – Vol. 9, N 6. – P. 563–570. <https://doi.org/10.1038/nchem.2696>
8. Large Excitonic Reflectivity of Monolayer MoSe<sub>2</sub> Encapsulated in Hexagonal Boron Nitride / G. Scuri [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2018. – Vol. 120, N 3. – Art. 037402. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.120.037402>
9. Андреев, А. В. Кооперативные явления в оптике. Сверхизлучение. Бистабильность. Фазовые переходы / А. В. Андреев, В. И. Емельянов, Ю. А. Ильинский. – М., 1988. – 288 с.
10. Формирование сверхизлучения в наногетероструктурах с квантовыми точками / А. В. Савельев [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. – 2008. – Т. 42, № 6. – С. 730–735.
11. Маликов, Р. Ф. Оптическая бистабильность и гистерезис тонкого слоя резонансных излучателей: взаимное влияние неоднородного уширения линии поглощения и локального поля Лоренца / Р. Ф. Маликов, В. А. Малышев // *Оптика и спектроскопия*. – 2017. – Т. 122, № 6. – С. 1000–1009.
12. Рупасов, В. И. О граничных задачах в нелинейной оптике резонансных сред / В. И. Рупасов, В. И. Юдсон // *Квантовая электроника*. – 1982. – Т. 9, № 11. – С. 2179–2186.
13. Malikov, R. Nonlinear optical response of a 2D quantum dot supercrystal / R. Malikov, I. Ryzhov, V. Malyshev // *EPJ Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 161. – P. 02014. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201716102014>
14. Timoschenko, E. V. Resonance reflection of Light by a Thin Layer of Dense Nonlinear Medium / E. V. Timoschenko, V. A. Yurevich, Yu. V. Yurevich // *Technical Physics*. – 2013. – Vol. 58, N 2. – P. 251–254. <https://doi.org/10.1134/s1063784213020254>
15. Петров, Н. С. Лазерная генерация тонких инверсных слоев / Н. С. Петров, А. Б. Зимин // *Журн. прикл. спектр.* – 2010. – Т. 77, № 1. – С. 69–73.

### References

1. Alù A. Prime time. *Nature Materials*, 2016, vol. 15, no. 12, pp. 1229–1231. <https://doi.org/10.1038/nmat4814>
2. Soukoulis C. M., Wegener M. Optical Metamaterials – More Bulky and Less Lossy. *Science*, 2010, vol. 330, no. 6011, pp. 1633–1634. <https://doi.org/10.1126/science.1198858>
3. Manzeli S., Ovchinnikov D., Pasquier D., Yazyev O. V., Kis A. 2D transition metal dichalcogenides. *Nature Review Materials*, 2017, vol. 2, no. 8, art. 17033. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.33>

4. Boneschanscher M. P., Evers W. H., Geuchies J. J., Altantzis T., Goris B., Rabouw F. T., van Rossum S. A. P., van der Zant H. S. J., Siebbeles L. D. A., van Tendeloo G., Swart I., Hilhorst J., Petukhov A. V., Bals S., Vanmaekelbergh D. Long-range orientation and atomic attachment of nanocrystals in 2D honeycomb superlattices. *Science*, 2014, vol. 344, no. 6190, pp. 1377–1380. <https://doi.org/10.1126/science.1252642>

5. Evers W. H., Goris B., Bals S., Casavola M., de Graaf J., van Roij R., Dijkstra M., Vanmaekelbergh D. Low-Dimensional Semiconductor Superlattices Formed by Geometric Control over Nanocrystal Attachment. *Nano Letters*, 2013, vol. 13, no. 6, pp. 2317–2323. <https://doi.org/10.1021/nl303322k>

6. Li L., Yu Y., Ye G. J., Ge Q., Ou X., Wu H., Feng D., Chen X. H., Zhang Yu. Black phosphorus field-effect transistors. *Nature Nanotechnology*, 2014, vol. 9, no. 5, pp. 372–377. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.35>

7. Liu W., Luo X., Bao Y., Liu Y. P., Ning G.-H., Abdelwahab I., Li L., Nai Ch. T., Hu Zh. G., Zhao D., Liu B., Ying Q., Loh K. P. A two-dimensional conjugated aromatic polymer via C–C coupling reaction. *Nature Chemistry*, 2017, vol. 9, no. 6, pp. 563–570. <https://doi.org/10.1038/nchem.2696>

8. Scuri G., Zhou Y., High A. A., Wild D. S., Shu Chi, de Greve K., Jauregui L. A., Taniguchi T., Watanabe K., Kim Ph., Lukin M. D., Park H. Large Excitonic Reflectivity of Monolayer MoSe<sub>2</sub> Encapsulated in Hexagonal Boron Nitride. *Physical Review Letters*, 2018, vol. 120, no. 3, art. 037402. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.120.037402>

9. Andreev A. V., Emel'yanov V. I., Il'inskij Yu. A. *Cooperative effects in optics: Superradiation. Bistability. Phase transitions*. Moscow, 1988. 288 p. (in Russian).

10. Savelyev A. V., Karachinsky L. Ya., Novikov I. I., Gordeev N. Yu., Seisyan R. P., Zegrya G. G. Generation of superradiation in quantum dot nanoheterostructures. *Semiconductors*, 2008, vol. 42, no. 6, pp. 714–719. <https://doi.org/10.1134/s1063782608060134>

11. Malikov R. F., Malyshev V. A. Optical bistability and hysteresis of a thin layer of resonant emitters: interplay of inhomogeneous broadening of the absorption line and the Lorentz local field. *Optics and Spectroscopy*, 2017, vol. 122, no. 6, pp. 955–963. <https://doi.org/10.1134/s0030400x17060121>

12. Rupasov V. I., Yudson V. I. Boundary-value problems in nonlinear optics of resonant media. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1982, vol. 12, no. 11, pp. 1415–1419. <https://doi.org/10.1070/qe1982v012n11label006090>

13. Malikov R., Ryzhov I., Malyshev V. Nonlinear optical response of a 2D quantum dot supercrystal. *EPJ Web of Conferences*, 2017, vol. 161, art. 02014. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201716102014>

14. Timoshchenko E. V., Yurevich V. A., Yurevich Yu. V. Resonance reflection of light by a thin layer of a dense nonlinear medium. *Technical Physics*, 2013, vol. 58, no. 2, pp. 251–254. <https://doi.org/10.1134/s1063784213020254>

15. Petrov N. S., Zimin A. B. Laser generation in thin inverse layers. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2010, vol. 77, no. 1, pp. 60–64. <https://doi.org/10.1007/s10812-010-9293-9>

### Информация об авторах

Тимощенко Елена Валерьевна – канд. физ.-мат. наук, профессор. Могилевский государственный университет им. А. А. Кулешова (ул. Космонавтов, 1, 212022, Могилев, Республика Беларусь). E-mail: timoshchenko@msu.by.

Юревич Владимир Антонович – д-р физ.-мат. наук, профессор. Могилевский государственный университет им. А. А. Кулешова (ул. Космонавтов, 1, 212022, Могилев, Республика Беларусь). E-mail: va\_yurevich@mail.ru.

### Information about the authors

Timoshchenko Elena V. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Professor. Mogilev State A. Kuleshov University (1, Kosmonavtov Str., 212022, Mogilev, Republic of Belarus). E-mail: timoshchenko@msu.by.

Yurevich Vladimir A. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor. Mogilev State A. Kuleshov University (1, Kosmonavtov Str., 212022, Mogilev, Republic of Belarus). E-mail: va\_yurevich@mail.ru.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 539.143.5

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-670-677>

Поступило в редакцию 21.10.2020

Received 21.10.2020

**Т. Н. Сидорова, А. Л. Данилюк, В. Е. Борисенко***Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Республика Беларусь***СПИН-ЗАВИСИМОЕ ТУННЕЛИРОВАНИЕ  
НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ДИОКСИДА ТИТАНА***(Представлено академиком В. А. Лабуновым)*

**Аннотация.** Представлены результаты моделирования спин-зависимого туннелирования электронов на поверхностные состояния диоксида титана, образованные адсорбированными органическими соединениями. Коэффициент туннельной прозрачности для генерируемых солнечным светом электронов рассчитан с помощью разработанной модели на основе метода фазовых функций. В качестве инжектора спин-зависимых электронов в диоксид титана в структуре используется пленка ферромагнетика. Показано, что величина спиновой поляризации электронов на поверхностных состояниях составляет 10–25 %, что может способствовать реализации спинового катализа процессов разложения органических соединений на поверхности диоксида титана.

**Ключевые слова:** спин-зависимое туннелирование, коэффициент туннельной прозрачности, диоксид титана, поверхностные состояния

**Для цитирования.** Сидорова, Т. Н. Спин-зависимое туннелирование на поверхностные состояния диоксида титана / Т. Н. Сидорова, А. Л. Данилюк, В. Е. Борисенко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 670–677. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-670-677>

**Tatiana N. Sidorova, Alexandr L. Danilyuk, Viktor E. Borisenko***Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus***SPIN-DEPENDANT TUNNELING TO THE SURFACE STATES OF TITANIUM DIOXIDE***(Communicated by Academician Vladimir A. Labunov)*

**Abstract.** Results of the simulation of spin-dependant tunneling of electrons to the surface states of the titanium dioxide, which are created by adsorbed organic impurities are performed. Tunneling transparency for sunlight generated electrons is calculated by the Phase function method. A ferromagnetic film is considered to be an injector of spin-dependent electrons to the titanium dioxide. It is shown that electron spin polarization at the surface states reaches 10–25 %. It can contribute to the spin enhanced catalysis peeling a surface from organic impurities.

**Keywords:** spin-dependent tunneling, the tunneling transparency, titanium dioxide, surface states

**For citation:** Sidorova T. N., Danilyuk A. L., Borisenko V. E. Spin-dependant tunneling to the surface states of titanium dioxide. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 670–677 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-670-677>

**Введение.** В последнее десятилетие наибольший интерес для фотокаталитических применений представляют комбинированные структуры, имеющие в своем составе диоксид титана (TiO<sub>2</sub>) [1]. Он обусловлен привлекательными свойствами данного материала [2–5]. Например, сочетание его фотокаталитических свойств с возможностью получать развитую поверхность, удельная площадь которой варьируется в зависимости от метода синтеза от десятков до сотен квадратных метров на грамм вещества [6]. Фотокаталитические свойства этого материала обусловлены эффективной генерацией на его поверхности химических радикалов в процессе взаимодействия адсорбированных молекул воды и кислорода с фотовозбужденными электронами и дырками, которые участвуют в окислительно-восстановительных реакциях [7], приводящих к тому, что органические вещества (в том числе и токсичные) разлагаются до простых составляющих – углекислого газа и воды. Однако из-за относительно широкой запрещенной зоны (3,1–3,5 эВ) диоксида

титана возникает необходимость использования УФ-излучения с длиной волны меньше 400 нм. В спектре же солнечного света доля излучения с такими длинами волн не превышает 7 % [8]. Поэтому ведется активный поиск путей создания структур на основе  $\text{TiO}_2$ , обладающих фотокаталитической активностью в видимой части спектра солнечного излучения. Одним из них является использование гетероструктур из  $\text{TiO}_2$  и полупроводника с меньшей шириной запрещенной зоны, в частности кремния (Si).

Наряду с этим перспективным направлением является спиновый катализ [9], использующий стимулирование химических реакций за счет изменения спина реагирующих химических компонентов. Физический смысл и назначение спинового катализа состоит в том, чтобы снимать спиновый запрет, изменять спин реагентов и открывать каналы химической реакции, закрытые по спину. Эти функции выполняет спиновый катализатор – частица, несущая собственный электронный спин (атом, радикал или ион). Взаимодействуя с реагирующей системой, спиновый катализатор отождествляет свой спин со спином реагирующей системы. В такой обобщенной спиновой системе ранее закрытые реакционные каналы становятся открытыми, т. е. разрешенными по спину [10].

**Модель.** Рассмотрим процессы, происходящие в гетероструктуре  $\text{TiO}_2$ /ферромагнетик (ФМ)/Si, в которой пленка  $\text{TiO}_2$  имеет нанометровую толщину, ФМ – инжектор спин-поляризованных электронов с работой выхода 4,0–4,5 эВ, выполняющий функцию повышения степени поляризации электронов, сгенерированных в кремниевой подложке под действием падающего на нее пучка поляризованного света. Поскольку в гетероструктуре Si/ $\text{TiO}_2$ , облучаемой поляризованным солнечным светом, степень спиновой поляризации носителей заряда не высока, то нами в качестве источника спин-поляризованных электронов между Si и  $\text{TiO}_2$  применяется металлический спиновый инжектор (CoFe или Co), который может обеспечить необходимую величину спиновой поляризации. Потенциальная диаграмма такой структуры показана на рис. 1.

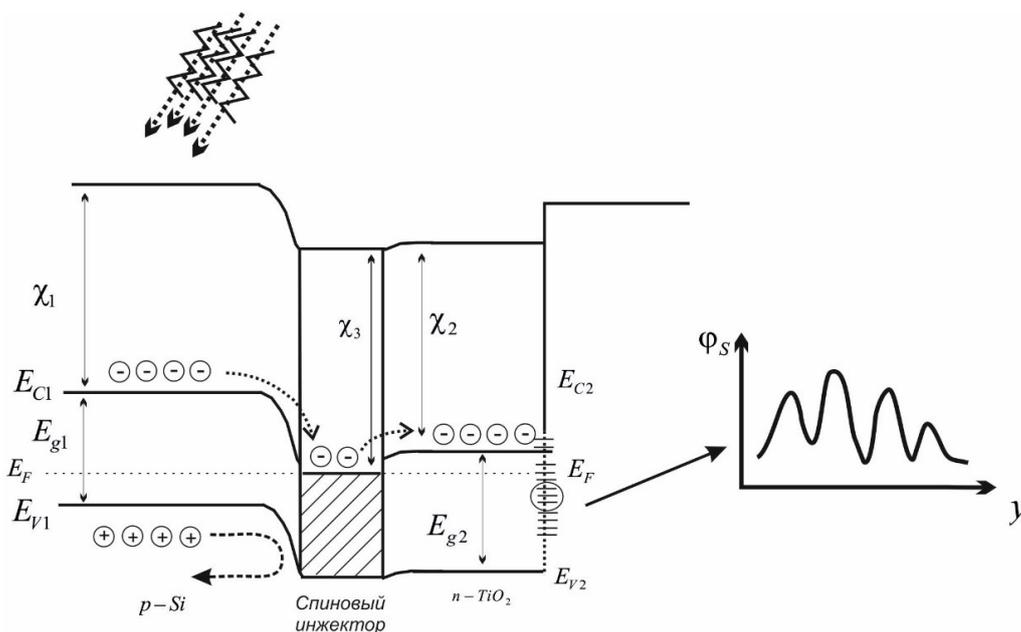


Рис. 1. Потенциальная диаграмма структуры  $\text{TiO}_2$ /спиновый инжектор/Si с учетом поверхностных состояний на  $\text{TiO}_2$

Fig. 1. Potential diagram of the  $\text{TiO}_2$ /spin injector/Si structure taking into account surface states at  $\text{TiO}_2$

Дырки, сгенерированные в кремнии, отталкиваются от потенциального барьера на границе со спиновым инжектором и рекомбинируют с электронами в кремнии. Электроны, генерируемые в кремнии, ввиду отсутствия потенциального барьера на границе со спиновым инжектором переходят в него. Далее электроны, приобретая определенную спиновую поляризацию, переходят в  $\text{TiO}_2$  и туннелируют на его поверхностные состояния. Потенциальный рельеф поверхности

TiO<sub>2</sub>, обусловленный поверхностными состояниями, образованными адсорбированными на поверхности TiO<sub>2</sub> химическими компонентами, в общем случае имеет достаточно сложную форму. Потенциальный рельеф включает локальные энергетические максимумы и минимумы, отражающие определенные поверхностные состояния и возможные переходы электронов между ними. Прохождение электронов на поверхностные состояния происходит путем их туннелирования из объема TiO<sub>2</sub>. При наличии спиновой поляризации электроны с различной ориентацией спина приобретают селективность в процессах туннелирования и процессах взаимодействия с органическими комплексами на поверхности TiO<sub>2</sub>.

Обычно для расчетов коэффициента туннельной прозрачности потенциальных барьеров используют два подхода. Первый – упрощенный – основан на квазиклассическом приближении, известном как метод Вентцеля–Крамерса–Бриллюэна (ВКБ) [11]. Второй подход предполагает прямое решение уравнения Шрёдингера с соответствующим потенциальным барьером [12]. Расчет коэффициента туннельной прозрачности на основе приближения ВКБ возможен, если потенциальный рельеф удовлетворяет условию квазиклассичности на всем протяжении барьера (за исключением только непосредственной окрестности точек поворота). Однако часто потенциальная энергия для туннелирующих через барьеры электронов не удовлетворяет условию квазиклассичности. Используя второй из перечисленных подходов, для того чтобы найти коэффициент туннельной прозрачности, обычно аппроксимируют потенциальный барьер прямоугольными потенциалами и «сшивают» решения уравнения Шрёдингера, полученные в каждой из выделенных областей. Для барьеров достаточно сложного вида, как в рассматриваемом случае, эта процедура является весьма трудоемкой, а кроме того, затруднена оценка погрешности получаемого результата. Для устранения недостатков двух указанных подходов нами разработана модель на основе метода фазовых функций [13], позволяющая рассчитывать туннельную прозрачность для потенциалов достаточно сложного вида. Модель учитывает вид и параметры барьера, потенциал сил изображения, позволяет включать потенциальный рельеф границ раздела. Метод фазовых функций дает возможность построить простой и удобный алгоритм вычисления интересующих нас параметров, свободный от упомянутых недостатков стандартного подхода. Будем вычислять не саму волновую функцию, а только ее изменение вследствие действия потенциала.

Используем квазиодномерное уравнение Шрёдингера для каждой спиновой компоненты в виде

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m_{\uparrow\downarrow}^*} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\hbar^2 k_{\parallel}^2}{2m_{\uparrow\downarrow}^*} + U_0 - h_0 \sigma - qV_p(x) - q\phi(x) \pm V_{sc}(x) \right] \psi_{\uparrow\downarrow}(x) = E \psi_{\uparrow\downarrow}(x),$$

где  $x$  – координата в направлении туннелирования;  $\sigma$  – индекс спина (спин-вверх и спин-вниз);  $m^*$  и  $E$  – эффективная масса и энергия туннелирующего электрона;  $h_0$  – молекулярное поле в ферромагнетике;  $V_p$  – потенциал, обусловленный внешним электрическим полем на поверхности TiO<sub>2</sub>;  $V_{sc}$  – потенциал рассеяния;  $\hbar$  – редуцированная постоянная Планка;  $U_0$  – максимальная высота потенциального барьера на поверхности TiO<sub>2</sub> для электронов из зоны проводимости.

Согласно методу фазовых функций [13], уравнение для функции отражения  $B(x)$  от потенциального барьера имеет вид

$$\frac{dB_{\uparrow\downarrow}(x)}{dx} = -\frac{U_{eff}(x)}{2ik_{\uparrow\downarrow}} [\exp(ik_{\uparrow\downarrow}x) + B_{\uparrow\downarrow}(x) \exp(-ik_{\uparrow\downarrow}x)]^2$$

с граничным условием  $B_{\uparrow\downarrow}(x \rightarrow +\infty) = 0$ , где  $i$  – мнимая единица;  $k_{\uparrow\downarrow} = \sqrt{2m_{\uparrow\downarrow}^* (E \pm h_0 \sigma) / \hbar^2}$  – волновой вектор туннелирующих электронов; эффективный потенциал  $U_{eff}(x)$ , равный в данном случае

$$U_{eff} = (2m_{\sigma}^* / \hbar^2) (U_0 + k_{\parallel}^2 - qV_p(x) - q\phi(x) \pm V_{sc}(x)).$$

Величина квадрата модуля функции отражения имеет смысл коэффициента отражения на лежащей в интервале  $(x, +\infty)$  части потенциала, т. е.  $R(x) = |B(x)|^2$ . Принимая, что  $B(x) = a(x) + ib(x)$  и разлагая  $\exp(\pm ikx)$ , получим следующую систему уравнений для нахождения компонент функции отражения:

$$\frac{da_{\uparrow\downarrow}(x)}{dx} = \frac{U_{eff}(x)}{2k_{\uparrow\downarrow}} [-\sin(2k_{\uparrow\downarrow}x) - 2b_{\uparrow\downarrow} + (a_{\uparrow\downarrow}^2 - b_{\uparrow\downarrow}^2)\sin(2k_{\uparrow\downarrow}x) - 2a_{\uparrow\downarrow}b_{\uparrow\downarrow}\cos(2k_{\uparrow\downarrow}x)], \quad (1)$$

$$\frac{db_{\uparrow\downarrow}(x)}{dx} = \frac{U_{eff}(x)}{2k_{\uparrow\downarrow}} [\cos(2k_{\uparrow\downarrow}x) + 2a_{\uparrow\downarrow} + (a_{\uparrow\downarrow}^2 - b_{\uparrow\downarrow}^2)\cos(2k_{\uparrow\downarrow}x) - 2a_{\uparrow\downarrow}b_{\uparrow\downarrow}\sin(2k_{\uparrow\downarrow}x)]. \quad (2)$$

Коэффициент туннельного прохождения электронов через барьер равен

$$D_{\uparrow\downarrow} = \exp\left[\frac{1}{k_{\uparrow\downarrow}} \int_0^d U_{eff}(x)[b_{\uparrow\downarrow}(x)\cos(2k_{\uparrow\downarrow}x) - a_{\uparrow\downarrow}(x)\sin(2k_{\uparrow\downarrow}x)]dx\right], \quad (3)$$

где  $d$  – ширина туннельного барьера.

Система уравнений (1)–(3) позволяет рассчитать коэффициент туннельной прозрачности  $D(E)$  при туннелировании электронов, сгенерированных солнечным светом, на поверхностные состояния диоксида титана. Ее величина зависит от энергетического спектра электронов, образовавшихся в кремнии, который в свою очередь определяется интенсивностью и спектральным составом солнечного света  $I(E)$ .

Степень спиновой поляризации электронов на поверхностных состояниях определяется разницей значений волнового вектора на уровне Ферми для электронов спин-вверх и спин-вниз. Ее величину находим из выражения

$$P = \frac{|D_{\uparrow} - D_{\downarrow}|}{D_{\uparrow} + D_{\downarrow}},$$

где  $D_{\uparrow}$  и  $D_{\downarrow}$  – туннельная прозрачность для электронов спин-вверх и спин-вниз соответственно.

**Результаты и их обсуждение.** В соответствии с предложенной моделью рассчитаны параметры двух возможных потенциальных рельефов в  $\text{TiO}_2$  и коэффициенты их туннельной прозрачности для электронов, генерируемых солнечным светом в Si и туннелирующих на поверхностные состояния  $\text{TiO}_2$ , образованные адсорбированными органическими соединениями. Рис. 2 иллюстрирует эти потенциальные рельефы.

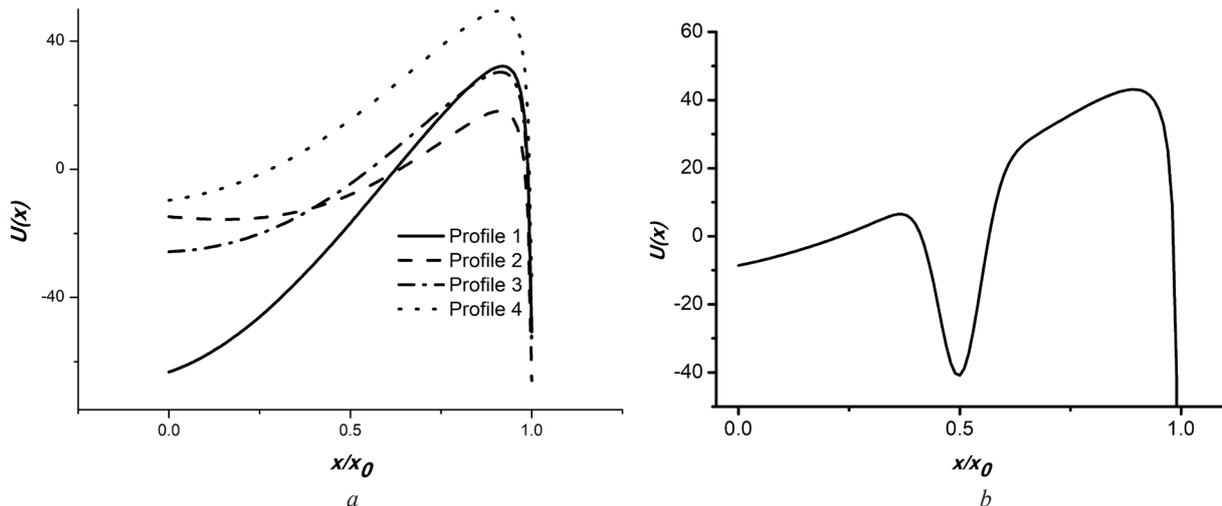


Рис. 2. Форма потенциального рельефа первого (a) и второго (b) вида

Fig. 2. Potential relief form or the first (a) and second (b) types

На рис. 3 приведены результаты расчетов степени спиновой поляризации электронов на поверхностные состояния в зависимости от потенциала, создаваемого внешним полем на поверхности диоксида титана  $V_p$ , и уровня спиновой поляризации электронов  $\sigma$ , инжектированных в диоксид титана из ФМ, для потенциального рельефа первого вида. Следует отметить, что степень

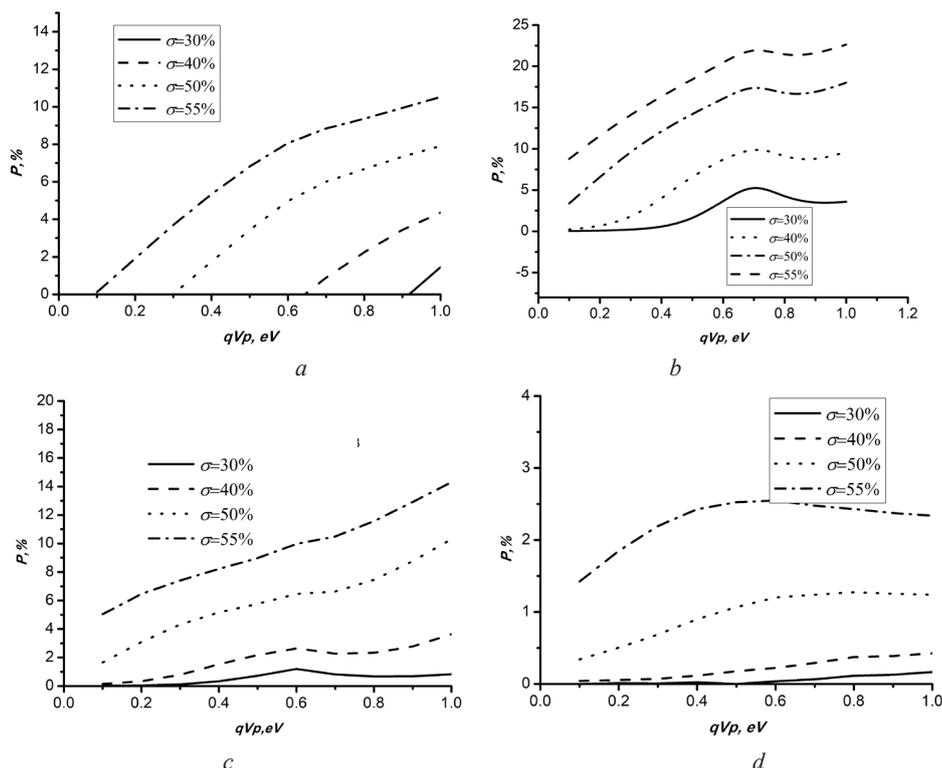


Рис. 3. Степень спиновой поляризации электронов  $P$  на поверхности  $\text{TiO}_2$  в зависимости от потенциала  $V_p$  и начальной спиновой поляризации  $\sigma$  для потенциального рельефа первого вида:  $a$  – профиль 1;  $b$  – профиль 2;  $c$  – профиль 3;  $d$  – профиль 4

Fig. 3. Degree of spin-polarization  $P$  at the  $\text{TiO}_2$  surface depending on the potential  $V_p$  and initial spin polarization  $\sigma$  for the potential relief of the first type:  $a$  – profile 1;  $b$  – profile 2;  $c$  – profile 3;  $d$  – profile 4

спиновой поляризации электронов на поверхности всегда ниже их спиновой поляризации в инжекторе, что в данном случае связано с наличием отражения части электронов от потенциального барьера.

Для потенциального барьера (рис. 2,  $a$ , профиль 1) в области потенциальной энергии  $qV_p$  вблизи 1 эВ имеет место увеличение крутизны переднего фронта барьера. В результате степень поляризации характеризуется порогом с увеличением  $qV_p$ , после которого наблюдается монотонный почти линейный ее рост, рис. 3,  $a$ . Наибольшее изменение и меньший порог наблюдаются для начальной степени поляризации инжектированных в  $\text{TiO}_2$  электронов, равной 55%. Величина спиновой поляризации на поверхностных состояниях при этом увеличивается до 10–12%. Наименьшее изменение  $P$  наблюдается при  $\sigma = 30\%$ , когда  $P$  не превышает 1% при  $qV_p = 1$  эВ.

Для потенциального барьера (рис. 2,  $a$ , профиль 2), для которого в отличие от профиля 1 при увеличении потенциала  $V_p$  наблюдается уменьшение крутизны переднего фронта, снижение высоты барьера, формирование пологой ямы, характер зависимости  $P(qV_p)$  нелинейный. При увеличении  $qV_p$  до 0,6 эВ,  $P$  увеличивается почти линейно (рис. 3,  $b$ ). Далее наблюдается выход на насыщение при  $qV_p$  в области 0,7 эВ и небольшой завал при  $qV_p = 0,85$ –0,9 эВ.

Профиль 3 является промежуточным между профилем 1 и профилем 2 и характеризуется тем, что при увеличении  $qV_p$  наблюдается уменьшение крутизны переднего фронта, снижение высоты барьера (однако не так ярко выражено как в профиле 2), формирование ямы (аналогично профилю 2). В области  $qV_p = 0$ –0,6 эВ зависимость  $P(qV_p)$  изменяется линейно аналогично вышеописанным случаям. Степень поляризации  $P$  при этом достигает 1% при  $\sigma = 30\%$ , 2% при  $\sigma = 40\%$ , 6% и 10% при  $\sigma = 50\%$  и  $\sigma = 55\%$  соответственно (рис. 3,  $c$ ). В области  $qV_p = 0,6$ –0,7 эВ наблюдается насыщение при низких начальных поляризациях ( $\sigma = 30\%$  и  $\sigma = 40\%$ ), а при дальнейшем увеличении  $qV_p$  график остается неизменным. Данное поведение аналогично описанному для профиля 2. Однако при высоких начальных поляризациях ( $\sigma = 50\%$  и  $\sigma = 55\%$ ) при

$qV_p > 0,6$  эВ наблюдается отсутствие области насыщения и дальнейший рост степени поляризации до 10 и 14 % соответственно.

Для профиля 4 при увеличении потенциала  $qV_p$  происходит увеличение высоты и крутизны переднего фронта барьера. В таком случае наблюдается выход на насыщение при меньших значениях  $qV_p$  и малые значения поляризации (максимально 1–3 %) (рис. 3, *d*), чем для вышеописанных рельефов.

На основе рассмотренных вариантов можно заключить, что чем уже барьер, тем больше вероятность туннелирования и повышения когерентности (уменьшение фазовых сдвигов). Кроме того, передняя часть профиля при увеличении потенциала попадает в отрицательную область, т. е. сильного снижения части барьера. Указанные два фактора приводят как к существенному росту степени поляризации, так и к насыщению ее.

Была также рассчитана зависимость  $P(qV_p)$  для рельефа второго вида (два потенциальных барьера, разделенных потенциальной ямой, рис. 2, *b*) при изменении ширины потенциальной ямы – рис. 4.

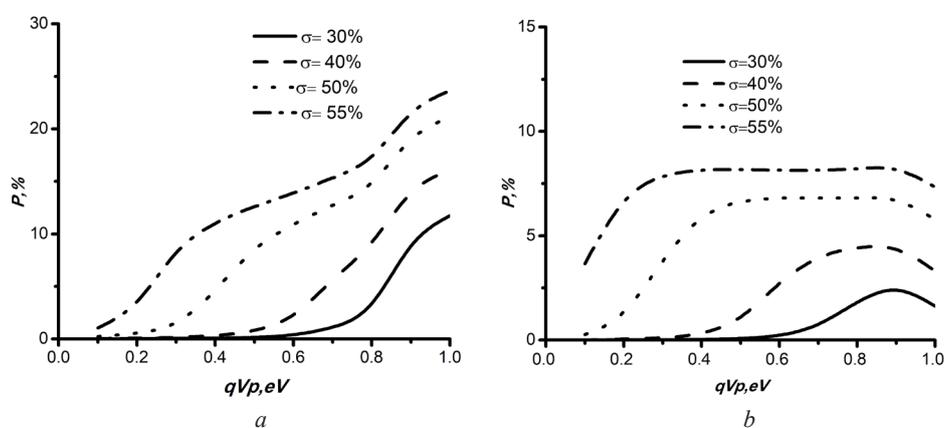


Рис. 4. Степень спиновой поляризации электронов  $P$  на поверхности  $\text{TiO}_2$  в зависимости от потенциала  $V_p$  и начальной спиновой поляризации  $\sigma$  для потенциального рельефа второго вида при ширине потенциальной ямы  $x_0$  (*a*) и  $2x_0$  (*b*)

Fig. 4. Degree of spin-polarization  $P$  at the  $\text{TiO}_2$  surface depending on the potential  $V_p$  and initial spin polarization  $\sigma$  for the potential relief of the second type with the width of the potential well of  $x_0$  (*a*) and  $2x_0$  (*b*)

В случае узкой ямы наблюдается первоначальный порог и дальнейший резкий рост степени поляризации до 25 % (рис. 4, *a*). При увеличении ширины потенциальной ямы наблюдается иной характер зависимостей – появляется область насыщения (рис. 4, *b*): при увеличении  $qV_p$  с 0 до некоторого значения ( $qV_p = 0,2$  эВ для  $\sigma = 55\%$ ,  $qV_p = 0,4$  эВ для  $\sigma = 50\%$ ,  $qV_p = 0,7$  эВ для  $\sigma = 40\%$ ,  $qV_p = 0,85$  эВ для  $\sigma = 30\%$ ) степень поляризации возрастает, после чего остается неизменной. Когда  $qV_p = 0,9$  эВ для всех рассматриваемых зависимостей, степень поляризации  $P$  начинает постепенно снижаться.

**Заключение.** Проведенным нами моделированием установлена взаимосвязь степени спиновой поляризации электронов на поверхностных состояниях от уровня их начальной спиновой поляризации, создаваемой ферромагнитной пленкой, и от потенциала, обусловленного внешним электрическим полем на поверхности  $\text{TiO}_2$ . Данная взаимосвязь была рассмотрена для потенциальных рельефов, представляющих одиночный потенциальный барьер и два потенциальных барьера, разделенных потенциальной ямой. В первом случае с ростом начальной поляризации и увеличением внешнего потенциала степень спиновой поляризации возрастает почти линейно до 10 %. Во втором случае для относительно узкой ямы зависимость степени поляризации электронов от приложенного потенциала имеет сверхлинейный характер, а ее величина достигает 20 %. Однако для широкой потенциальной ямы меняется характер зависимостей и возникает область насыщения. При этом величина степени спиновой поляризации не превышает 7,5 %. Такое поведение объясняется селективностью резонансного прохождения спин-зависимых элек-

тронов через дискретные уровни в квантовой яме и интерференцией электронных волн, отраженных от второго барьера. Установленные взаимосвязи позволяют конструировать фотокаталитические покрытия на основе Si/ФМ/TiO<sub>2</sub> гетероструктур с максимальной эффективностью.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках проекта Государственной программы научных исследований «Конвергенция–2020». В. Е. Борисенко благодарит Программу повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (“Improving of the Competitiveness” Program of the National Research Nuclear University MEPhI) за частичную финансовую поддержку выполненных исследований.

**Acknowledgments.** The research is performed within the framework of the project of the State Research Program “Convergence–2020”. V. E. Borisenko is grateful to the Program of the National Research Nuclear University MEPhI “Improving of the Competitiveness for Partial Financial Support of the Performed Investigations”.

### Список использованных источников

1. Наноматериалы на основе диоксида титана с высокой фотокаталитической активностью / Е. А. Константинова [и др.] // Российские нанотехнологии. – 2019. – Т. 14, № 5–6. – С. 3–10. <https://doi.org/10.21517/1992-7223-2019-5-6-3-10>
2. Antireflecting – passivating dielectric films on crystalline silicon solar cells for space applications / M. Barrera [et al.] // *Solar Energy Mater. Sol. Cells*. – 2008. – Vol. 92, N 9. – P. 1115–1122. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.03.021>
3. Soga, T. *Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion* / T. Soga. – Amsterdam, 2006. – P. 200–216. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-52844-5.x5000-8>
4. Electrical and photoelectrical properties of photosensitive heterojunctions *n*-TiO<sub>2</sub>/*p*-CdTe / V. V. Brus [et al.] // *Semicond. Sci. Technol.* – 2011. – Vol. 26, N 12. – P. 125006. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/26/12/125006>
5. Формирование и антибактериальные свойства композиционных наноструктур из оксидов титана и меди / Н. М. Денисов [и др.] // *Неорганические материалы*. – 2016. – Т. 52, № 5. – С. 570–575. <https://doi.org/10.7868/s0002337x16050031>
6. Артемьев, Ю. М. Введение в гетерогенный фотокатализ / Ю. М. Артемьев, В. К. Рябчук. – СПб., 1999. – 303 с.
7. Linsebigler, A. T. *Photocatalysis on TiO<sub>2</sub> Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results* / A. T. Linsebigler, G. Lu, J. T. Yates // *Chemical Reviews*. – 1995. – Vol. 95, N 3. – P. 735–758. <https://doi.org/10.1021/cr00035a013>
8. Sharma, B. L. *Semiconductor Heterojunctions* / B. L. Sharma, R. K. Purohit. – Oxford, 1974. – 224 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-10076-1>
9. Бучаченко, А. Л. Спиновый катализ – новый вид катализа в химии / А. Л. Бучаченко, В. Л. Бердинский // *Успехи химии*. – 2004. – Т. 73, № 11. – С. 1123–1130.
10. Двухзонная проводимость TiO<sub>2</sub> / Д. В. Гриценко [и др.] // *Физика твердого тела*. – 2006. – Т. 48, № 2. – С. 210–213.
11. Маслов, В. П. Квазиклассическое приближение для уравнений квантовой механики / В. П. Маслов, М. В. Федорюк. – М., 1976. – 296 с.
12. Панфилёнок, А. С. Колебания туннельного магнитосопротивления в структуре ферромагнетик–диэлектрик–ферромагнетик / А. С. Панфилёнок, А. Л. Данилюк, В. Е. Борисенко // *Журн. техн. физики*. – 2008. – Т. 78, № 4. – С. 89–94.
13. Бабилов, В. В. Метод фазовых функций в квантовой механике / В. В. Бабилов. – М., 1976. – 224 с.

### References

1. Konstantinova E. A., Kushnikov M. P., Zaitsev V. B., Kytin V. G., Marikutsa A. V., Kashkarov P. K., Trusov G. V., Sedegov A. S. High photocatalytic activity nanomaterials based on titanium dioxide. *Nanotechnologies in Russia*, 2019, vol. 14, no. 5–6, pp. 190–196. <https://doi.org/10.1134/s1995078019030078>
2. Barrera M., Pla J., Bocchi C., Migliori A. Antireflecting-passivating dielectric films on crystalline silicon solar cells for space applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, vol. 92, no. 9, pp. 1115–1122. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.03.021>
3. Soga T. *Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion*. Amsterdam, 2006, pp. 200–216. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-52844-5.x5000-8>
4. Brus V. V., Ilashchuk M. I., Kovalyuk Z. D., Maryanchuk P. D., Ulyanytsky K. S. Electrical and photoelectrical properties of photosensitive heterojunctions *n*-TiO<sub>2</sub>/*p*-CdTe. *Semiconductor Sciences and Technology*, 2011, vol. 26, no. 12, pp. 125006. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/26/12/125006>
5. Denisov N. M., Baglov A. V., Borisenko V. E., Drozdova E. V. Preparation and antibacterial properties of composite nanostructures from titanium and copper oxides. *Inorganic Materials*, 2016, vol. 52, no. 5, pp. 523–528. <https://doi.org/10.1134/s0020168516050034>
6. Artem'ev Yu. M., Ryabchuk V. K. *Introduction to Heterogeneous Photocatalysis*. Saint Petersburg, 1999. 303 p. (in Russian).
7. Linsebigler A. L., Lu G., Yates J. T. Photocatalysis on TiO<sub>2</sub> Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results. *Chemical Reviews*, 1995, vol. 95, no. 3, pp. 735–758. <https://doi.org/10.1021/cr00035a013>
8. Sharma B. L., Purohit R. K. *Semiconductor Heterojunctions*. Oxford, 1974. 224 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-10076-1>
9. Buchachenko A. L., Berdinsky V. L. Spin catalysis as a new type of catalysis in chemistry. *Russian Chemical Reviews*, 2004, vol. 73, no. 11, pp. 1033–1039. <https://doi.org/10.1070/rc2004v073n11abeh000888>

10. Gritsenko D. V., Shaimeev S. S., Atuchin V. V., Grigor'eva T. I., Pokrovskii L. D., Pchelyakov O. P., Gritsenko V. A., Aseev A. L., Lifshits V. G. Two-band conduction in  $\text{TiO}_2$ . *Physics of the Solid State*, 2006, vol. 48, no. 2, pp. 224–228. <https://doi.org/10.1134/s1063783406020053>
11. Maslov V. P., Fedoruk M. V. *Quasiclassical approximation for the equations of quantum mechanics*. Moscow, 1976. 296 p. (in Russian).
12. Panfilenok A. S., Danilyuk A. L., Borisenko V. E. Oscillations of tunnel magnetoresistance in ferromagnet–insulator–ferromagnet structures. *Technical Physics*, 2008, vol. 53, no. 4, pp. 479–484. <https://doi.org/10.1134/s1063784208040142>
13. Babikov V. V. *Phase function method in quantum mechanics*. Moscow, 1976. 224 p. (in Russian).

### Информация об авторах

*Сидорова Татьяна Николаевна* – мл. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sharsu\_antea@bk.ru.

*Данилюк Александр Леонидович* – канд. физ.-мат. наук, доцент. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: danilyuk@nano-center.org.

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

### Information about the authors

*Sidorova Tatiana N.* – Junior researcher. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sharsu\_antea@bk.ru.

*Danilyuk Alexandr L.* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: danilyuk@nano-center.org.

*Borisenko Victor E.* – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: borisenko@bsuir.by.

**ХИМИЯ**  
**CHEMISTRY**УДК 544.723.54, 544.725.2  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-678-684>Поступило в редакцию 11.11.2020  
Received 11.11.2020**Е. В. Воробьёва***Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, Республика Беларусь***ВЛАГОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ  
НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОГО ГИДРОГЕЛЯ И БЕНТОНИТА***(Представлено академиком Н. П. Крутько)*

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы получения, сорбционные и реологические свойства композиционных материалов на основе полимерного гидрогеля и бентонита. Показано, что бентонит препятствует коллапсу гидрогеля в водных растворах электролитов и приводит к увеличению влагосодержания после коллапса. После нескольких повторных циклов набухания в воде с последующей сушкой при 60 и 110 °С степень набухания композита выше, чем гидрогеля. В интервале температур от 20 до 40 °С полимерный гидрогель и композит способны выдерживать не менее десяти циклов набухания и сушки без изменения степени набухания.

**Ключевые слова:** композиционный материал, полимерный гидрогель, бентонит, влагопоглощение, реология, набухание, коллапс

**Для цитирования.** Воробьёва, Е. В. Влагопоглощающие материалы на основе полимерного гидрогеля и бентонита / Е. В. Воробьёва // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 678–684. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-678-684>

**Elena V. Vorobieva***Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Minsk, Republic of Belarus***WATER-ABSORBING MATERIALS BASED ON POLYMER HYDROGEL AND BENTONITE***(Communicated by Academician Nikolay P. Krutko)*

**Abstract.** The article deals with the production, sorption and rheological properties of composite materials based on polymer hydrogel and bentonite. It is shown that bentonite prevents the collapse of the hydrogel in aqueous solutions of electrolytes and leads to an increase in the moisture content after the collapse. After several repeated cycles of swelling in water, followed by drying at 60 and 110 °C, the degree of swelling of the composite is higher than that of the hydrogel. In the temperature range from 20 to 40 °C, the polymer hydrogel and the composite are able to withstand at least ten cycles of swelling and drying without changing the degree of swelling.

**Keywords:** composite material, polymer hydrogel, bentonite, moisture absorption, rheology, swelling, collapse

**For citation:** Vorobieva E. V. Water-absorbing materials based on polymer hydrogel and bentonite. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 678–684 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-678-684>

**Введение.** Полимерные гидрогели привлекают в последние десятилетия все большее внимание исследователей благодаря уникальным свойствам, позволяющим использовать их в различных областях, в том числе связанных с медициной и биотехнологией [1–3]. В литературе описаны примеры применения таких гелей как компонентов систем с контролируемым выделением

лекарственного вещества, подложек для клеточной инженерии, материалов для имплантатов в хирургии, искусственных мышц, датчиков, а также в сельском хозяйстве и садоводстве, например, в устройствах с контролируемым высвобождением воды и питательных веществ в почвы [4; 5].

Однако обладая рядом существенных преимуществ: высокой сорбционной способностью, биосовместимостью, чувствительностью к внешним условиям, полимерные гидрогели имеют недостатки, в частности, низкие физико-механические параметры, которые затрудняют их практическое применение. Одним из способов улучшения эксплуатационных характеристик материалов является введение в полимерную матрицу наполнителей и модификаторов различной природы. В частности, показано, что введение в состав полимерных гидрогелей глинистых частиц придает гелям новые свойства, улучшает их сорбционные и механические характеристики, препятствует коллапсу при изменении внешних условий [6].

Особое место в нанотехнологиях занимает бентонит – природный глинистый тонкодисперсный высокопластичный материал, обладающий хорошими связующими и сорбционными свойствами. Для бентонитов, состоящих, в основном, из набухающих минералов монтмориллонита и беделита, характерно слоистое строение кристаллической решетки, что обуславливает их способность к поглощению воды [7; 8]. Использование бентонита в качестве наполнителя полимерной матрицы гидрогеля позволяет получать материалы с улучшенными сорбционными и физико-механическими свойствами, однако недостаток данных о взаимосвязи между составом и физико-химическими свойствами сорбирующих материалов препятствует расширению возможностей их практического применения.

В настоящем сообщении описаны условия получения композиционного материала на основе гидрогеля полиакриловой кислоты с поливиниловым спиртом с включенным (импрегнированным) в полимерную матрицу бентонитом, приведены результаты исследования влияния бентонита на сорбционные и реологические свойства гидрогеля.

**Материалы и методы исследования.** Для получения гидрогеля в работе использовали образцы полиакриловой кислоты (ПАК) с молекулярной массой (ММ)  $0,8 \cdot 10^5$  и поливинилового спирта (ПВС) (ММ  $0,95 \cdot 10^5$ ) (Aldrich). Водные растворы полимеров смешивали, понижали pH смеси добавлением соляной кислоты, проводили термообработку при различных температурах до образования нерастворимого в воде продукта. Методом потенциметрического титрования определяли количество карбоксильных групп ПАК, не вступивших в реакцию с ПВС.

Для получения композиционного материала готовили суспензию бентонита в воде, добавляли приготовленную смесь растворов ПАК и ПВС ( $\text{pH} < 3$ ) и проводили термообработку при  $120^\circ\text{C}$ . Содержание бентонита в материале от 1,0 до 5,0 мас. %.

Полученные гидрогели и композиционные материалы многократно промывали дистиллированной водой, сушили при температуре 60 или  $110^\circ\text{C}$ . Набухание образцов гидрогеля и композиционного материала с бентонитом определяли в воде при различных значениях pH и в водных растворах (концентрация 0,001 и 0,01 М) сульфатов калия, меди, железа (III). Для вычислений усредняли результаты, полученные при измерении набухания трех параллельных измерений; ошибка в определении не превышала 5 %. Степень набухания ( $Q$ , г/г) определяли по формуле

$$Q = (m_n - m_c) / m_c,$$

где  $m_n$  (г) и  $m_c$  (г) – масса равновесно набухшего и высушенного образца.

Для исследования кинетики коллапса в растворах солей равновесно набухшие в дистиллированной воде образцы гидрогеля и композиционного материала с бентонитом помещали в водный раствор (1 М) сульфата меди. Через определенные промежутки времени образцы гидрогелей доставали и взвешивали. Степень выделения жидкости из геля в процессе его коллапса ( $S$ , г/г) определяли по формуле

$$S = (m_b - m_{\text{сол}}) / m_{\text{сол}},$$

где  $m_b$  (г) – масса равновесно набухшего в дистиллированной воде образца;  $m_{\text{сол}}$  (г) – масса образца в водном растворе соли.

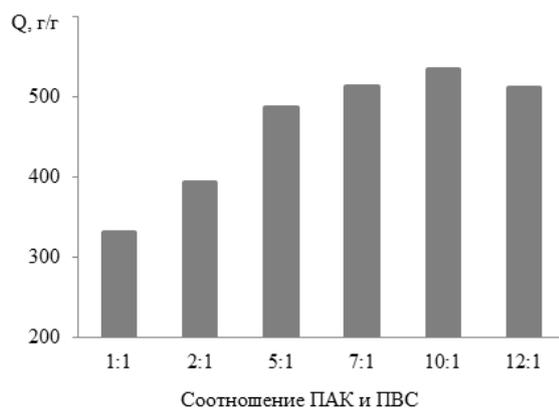


Рис. 1. Степень набухания полимерного гидрогеля в зависимости от соотношения полимеров

Fig. 1. The degree of the polymer hydrogel swelling depending on the polymer ratio

происходит образование сшитого полимерного продукта. Предполагается, что его структура формируется в виде совокупности клубков макромолекул поликислоты, сшитых цепочками ПВС в единую пространственную сетку. При набухании в воде происходит диссоциация карбоксильных групп ПАК, одноименно заряженные звенья полимерной сетки отталкиваются друг от друга и цепи, изначально свернутые в клубки – распрямляются. В результате синтезированный полимерный продукт значительно увеличивается в размерах, набухает, поглощая растворитель.

Как видно из рис. 1, степень набухания полученного сшитого продукта зависит от содержания ПВС в исходной смеси. Увеличение мольного соотношения ПАК и ПВС от 1 : 1 до 10 : 1 при прочих равных условиях (рН смеси 1,2; температура синтеза 120 °С) в смеси в 10 раз приводит к повышению степени набухания гидрогеля в дистиллированной воде в 1,6 раза.

Степень набухания гидрогеля в растворах солей уменьшается по сравнению с дистиллированной водой. Присутствие низкомолекулярных электролитов в поглощаемом растворе приводит к подавлению диссоциации групп полимерной сетки геля и увеличивает плотность двойного электрического слоя, вследствие чего диффузия растворителя в массу геля уменьшается. Перераспределение противоионов в поглощенной жидкости и их фиксация около противоположно заряженных функциональных групп полимерной сетки приводит к снижению осмотического давления, создаваемого внутри сетки геля противоионами. Общая концентрация подвижных ионов в геле выше, но разность между концентрациями ионов внутри и снаружи уменьшается. Следовательно, движущая сила набухания постепенно уменьшается с увеличением концентрации соли. Уменьшение степени набухания образцов с ростом содержания электролита может быть обусловлено несколькими причинами: во-первых, ухудшается термодинамическое качество растворителя – воды, в которой образцы находятся в максимально набухом состоянии; во-вторых, возможно, происходит подавление полиэлектролитного эффекта как результат экранирования заряженных ионов низкомолекулярными ионами.

Из таблицы следует, что набухание геля ПАК–ПВС в водных растворах сульфатов уменьшается в 1,1–1,3 раза в ряду  $K^+ \rightarrow Cu^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$  и возрастает во столько же раз с уменьшением на порядок концентрации соли. Можно предположить, что с увеличением концентрации низкомолекулярных ионов и взаимодействующих с катионами карбоксилат-ионов уменьшается количество групп, обеспечивающих набухание полимерной матрицы. Кроме того, на поверхности частиц гидрогеля возможно формирование «слоя», образованного молекулами полиакрилатов, препятствующего проникновению раствора внутрь полимерной сетки, что ограничивает набухание геля.

Для получения композиционного материала готовили суспензию бентонита в воде, добавляли приготовленную смесь растворов ПАК и ПВС (рН < 3) и проводили термообработку при 120 °С.

Синтез композиционного материала проводили в описанных выше условиях получения гидрогеля (мольное соотношение ПАК и ПВС 10 : 1; рН смеси 1,2; температура синтеза 120 °С).

Для исследования реологических свойств использовали дисперсию гидрогеля на основе ПАК и ПВС (соотношение ПАК и ПВС 10 : 1) и композиционного материала с бентонитом (содержание бентонита 1,0–3,0 мас. %), в которой дисперсной фазой (50 мас. %) являлись частицы набухшего материала размером от 0,2 до 0,8 мм, дисперсионной средой – вода.

**Результаты и их обсуждение.** В водных растворах в области низких значений рН карбоксильные группы ПАК взаимодействуют с функциональными группами электронодонорных полимеров, в частности, поливинилового спирта и полиэтиленгликоля [9; 10]. При повышенной температуре в результате реакции между карбоксильными группами поликислоты и гидроксильными группами ПВС, катализируемой протонами водорода,

**Изменение степени набухания ( $\Delta Q$ , %) образцов гидрогеля в растворах солей различной концентрации ( $Q$  за 3 ч набухания принята за 100 %)**

**Change of the swelling degree ( $\Delta Q$ , %) of hydrogel samples in the solutions of salts of various concentrations ( $Q$  for 3 hours of swelling is taken as 100 %)**

Концентрация соли, М Salt concentration, M	Время набухания, ч Swelling time, h	$\Delta Q$ , %		
		$K_2SO_4$	$CuSO_4$	$Fe_2(SO_4)_3$
0,001	0,5	75,2	65,4	60,4
	1,0	83,4	72,3	66,5
	1,5	86,6	75,6	69,8
	2,0	90,3	78,8	72,7
	2,5	98,5	85,6	78,6
0,01	0,5	63,6	57,5	55,4
	1,0	66,7	60,4	58,6
	1,5	69,2	63,2	60,4
	2,0	72,2	66,8	63,2
	2,5	76,0	69,1	66,1

Установлено, что набухание гидрогеля в воде и водных растворах солей практически не зависит от присутствия бентонита. Отсутствие дополнительного набухания гидрогеля в присутствии бентонита в водно-солевых растворах можно объяснить наличием дополнительных сшивок за счет координационных взаимодействий между катионами и карбоксилат-звеньями, в результате чего противоионы натрия не могут внести свой вклад в осмотическое давление [11; 12]. Увеличение доли бентонита более 5 мас. % приводит к снижению значений набухания полимерного материала, что объясняется ростом среднего эффективного числа физических узлов сетки при взаимодействии цепей полимера с увеличивающейся суммарно поверхностью и частиц модификатора – бентонита и, как следствие, ограничению подвижности цепей в процессе формирования поверхностного слоя [13].

Как видно из рис. 2, в водных растворах сульфата меди в течение первых нескольких минут содержание влаги уменьшается более чем в 5 раз в набухшем геле с бентонитом и без него.

Можно отметить, что присутствие бентонита в некоторой степени препятствует коллапсу, уменьшая степень выделения жидкости из полимерного гидрогеля. Этот эффект наиболее характерен для полимерных гидрогелей с более высоким содержанием бентонита (5 мас. %): на рис. 2 кривые коллапса имеют более крутой спуск для геля, чем для полимерного материала с бентонитом. Вероятное объяснение состоит в том, что пространственные взаимодействия между пластинами бентонита уменьшают коллапс гелей.

Наличие бентонита в составе полимерного гидрогеля приводит к повышенному в 1,5–2 раза влагосодержанию материалов после коллапса. При этом количество растворителя – воды, удерживаемой полимерным гелем при его набухании, в сколлапсированном состоянии материала увеличивается с ростом содержания бентонита. Это можно объяснить как стерическими взаимодействиями между частицами бентонита, так и нарушением однородности структуры полимерной сетки, препятствующим коллапсу гидрогеля.

Присутствие бентонита оказывает влияние на реологические свойства дисперсии полимерного гидрогеля. Как видно из рис. 3, вязкость дисперсии гидрогеля резко уменьшается в области небольших изменений напряжения сдвига. На реологических кривых композиционного материала

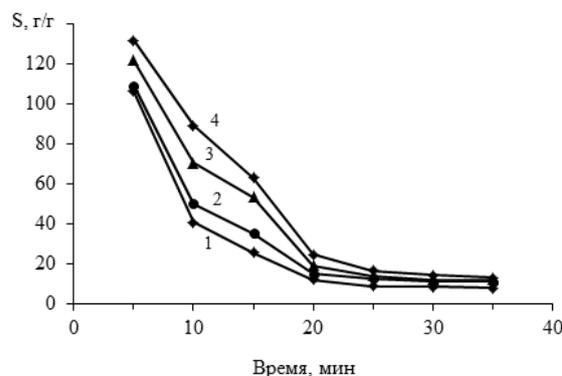


Рис. 2. Степень выделения жидкости ( $S$ , г/г) из полимерного гидрогеля ПАА–ПВС (1), содержащего 1,0 (2), 3,0 (3) и 5,0 (4) мас. % бентонита, в растворе сульфата меди

Fig. 2. The degree of liquid separation ( $S$ , g/g) from the polymer hydrogel PAA–PVA (1), containing 1.0 (2), 3.0 (3) and 5.0 (4) wt % bentonite, in copper sulfate solution

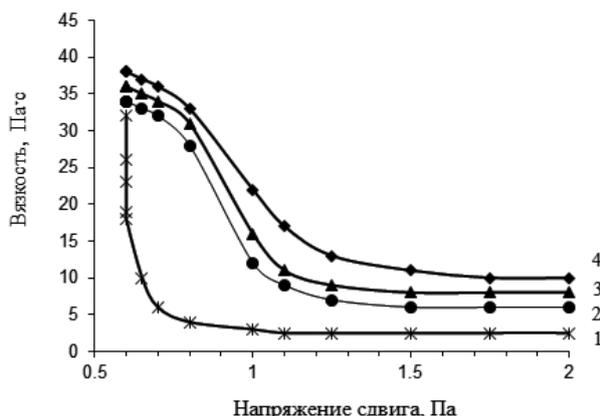


Рис. 3. Зависимость вязкости от напряжения сдвига дисперсии гидрогеля (1) и композиционного материала с бентонитом (2–4). Содержание бентонита, мас. %: 1 – 0; 2 – 1,0; 3 – 3,0; 4 – 5,0

Fig. 3. The dependence of the viscosity on the shear stress of the hydrogel dispersion (1) and the composite material with bentonite (2–4). Bentonite content, wt %: 1 – 0; 2 – 1.0; 3 – 3.0; 4 – 5.0

Дисперсию набухшего гидрогеля и композиционного материала с бентонитом сушили при температуре 60 или 110 °С, затем насыщали водой; цикл «сушка–набухание» проводили несколько раз. Результаты данного эксперимента показали (рис. 4), что степень набухания геля и композита после четырех циклов набухания и сушки при 60 °С уменьшается на 8–10 %. При температуре сушки 110 °С степень набухания геля уменьшается в 1,5 раза, композиционного материала – в 1,3 раза.

Обратимость индуцированного температурой процесса влагоотдачи геля подтверждает высказанное ранее предположение о структуре полимерной сетки в виде агрегатов из макромолекул ПАК, сшитых цепочками ПВС. Усиление гидрофобных взаимодействий с ростом температуры инициирует ассоциацию агрегатов. Степень набухания композиционного материала в циклах «сушка–набухание» выше по сравнению с гидрогелем, что обусловлено изменением структуры полимерной сетки при введении бентонита. Благодаря малому размеру частиц бентонита одно и то же количество полимера в композиционном материале обладает более развитой поверхностью, чем в форме макрогеля, что создает благоприятные условия для сорбции. Вследствие этого с увеличением количества циклов «сушка–набухание» влагопоглощение композиционного материала выше по сравнению с гидрогелем без наполнителя.

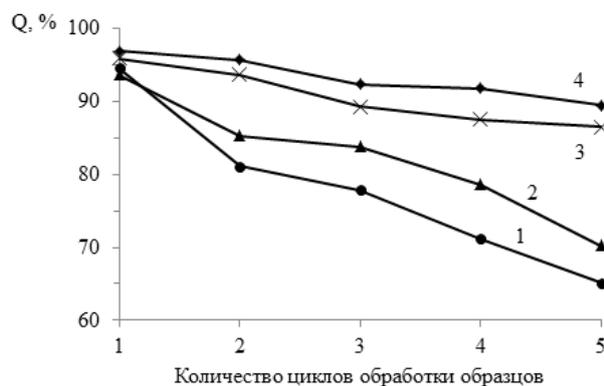


Рис. 4. Степень набухания образцов гидрогеля (1, 3) и композиционного материала с бентонитом (5,0 мас. %) (2, 4) в цикле «сушка–набухание». Температура сушки, °С: 1, 2 – 110; 3, 4 – 60

Fig. 4. The degree of the samples swelling of hydrogel (1, 3) and composite material with bentonite (5.0 mas. %) (2, 4) in the cycle «drying–swelling». Drying temperature, °С: 1, 2 – 110; 3, 4 – 60

с бентонитом появляется начальный участок, когда вязкость мало зависит от напряжения сдвига, что свидетельствует о сохранении структуры дисперсии. В этом случае вязкость с увеличением напряжения сдвига уменьшается менее резко по сравнению с гидрогелем, а значения вязкости выше.

Характер течения гидрогеля определяется скольжением дисперсной фазы (частиц дисперсии) и дисперсионной среды (межчастичной воды) относительно друг друга. В области низких значений напряжения сдвига (0,6–0,8 Па) одной из причин реологического поведения гидрогеля на начальном участке кривой является ориентация частиц в направлении сдвига и некоторое упорядочение взаимного расположения молекул, что снижает сопротивление течению. Частицы бентонита в водной дисперсии окружены гидратными оболочками, через которые возможно взаимодействие с гидрофильными частицами гидрогеля, что приводит к увеличению прочности структуры системы [14].

В интервале температур от 20 до 40 °С полимерный гидрогель и композиционный материал способны выдерживать не менее десяти циклов «сушка–набухание» без изменения степени набухания. Это позволяет использовать материалы с высокими показателями влагоудержания для улучшения водно-физического баланса засушливых почв.

**Заклучение.** Синтезированы гидрогель на основе полиакриловой кислоты с поливиниловым спиртом и композиционный гидрогелевый материал с бентонитом. Гравиметрическим методом исследована кинетика набухания и коллапса полимерного геля и его композитов с бентонитом в воде и водных растворах солей одно-, би- и трехвалентных металлов. Показано, что набухание геля в водных растворах сульфатов уменьшается в 1,1–1,3 раза в ряду  $K^+ \rightarrow Cu^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$  и практически не зависит от присутствия бентонита в интервале концентраций от 1 до 5 мас. %. Бентонит препятствует коллапсу композитов в водных растворах электролитов и приводит к увеличению влагосодержания после коллапса в 1,5–2 раза по сравнению с гелем.

Обнаружено, что степень набухания после четырех циклов набухания и сушки при 60 и 110 °C уменьшается в меньшей степени для композиционного материала, чем гидрогеля. В интервале температур от 20 до 40 °C полимерный гидрогель и композиционный материал способны выдерживать не менее десяти циклов набухания и сушки без изменения степени набухания.

### Список использованных источников

1. Роговина, Л. З. К определению понятия «полимерный гель» / Л. З. Роговина, В. Г. Васильев, Е. Е. Браудо // Высокомолекулярные соединения. Сер. С. – 2008. – Т. 50, № 7. – С. 1397–1406.
2. Osada, Y. Polymer gels / Y. Osada, J. P. Gong, Y. Tanaka // Journal of Macromolecular Science. – 2004. – Vol. 44, N 1. – P. 87–112. <https://doi.org/10.1081/mc-120027935>
3. Filippova, O. E. Responsive polymer gels / O. E. Filippova // Высокомолекулярные соединения. – 2000. – Т. 42, № 12. – С. 2328–2352.
4. Hydrogels in biology and medicine: From molecular principles to bionanotechnology / N. A. Peppas [et al.] // Advanced materials. – 2006. – Vol. 18, N 11. – P. 1345–1360. <https://doi.org/10.1002/adma.200501612>
5. Abd El-Mohdy, H. L. Radiation synthesis of nanosilver/polyvinyl alcohol/celluloseacetate/gelatin hydrogels for wound dressing / H. L. Abd El-Mohdy // Journal of Polymer Research. – 2013. – Vol. 20, N 6. – P. 177–189. <https://doi.org/10.1007/s10965-013-0177-6>
6. Евсикова, О. В. Синтез, набухание и адсорбционные свойства композитов на основе полиакриламидного геля и бентонита натрия / О. В. Евсикова, С. Г. Стародубцев, А. Р. Хохлов // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 2002. – Т. 44, № 5. – С. 802–808.
7. Соколов, В. Н. Глинистые породы и их свойства / В. Н. Соколов // Соросовский образовательный журн. – 2000. – Т. 6, № 9. – С. 59–65.
8. Осипов, В. И. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств / В. И. Осипов, В. Н. Соколов. – М., 2013. – 576 с.
9. Полимерные комплексы на основе полиакриловой кислоты, полиэтиленгликоля и поливинилового спирта / Е. В. Воробьева [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2008. – № 1. – С. 28–32.
10. Poly(vinyl alcohol)/poly(acrylic acid) hydrogels: FT-IR spectroscopic characterization of crosslinking reaction and work at transition point / K. F. Arndt [et al.] // Acta Polymerica. – 1999. – Vol. 50, N 11–12. – P. 383–390. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1521-4044\(19991201\)50:11/12%3C383::aid-apol383%3E3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/(sici)1521-4044(19991201)50:11/12%3C383::aid-apol383%3E3.0.co;2-z)
11. Equilibrium swelling and kinetics of pH-responsive hydrogels: models, experiments, and simulations / S. K. De [et al.] // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2002. – Vol. 11, N 5. – P. 544–555. <https://doi.org/10.1109/jmems.2002.803281>
12. Horkay, F. Osmotic swelling of polyacrylate hydrogels in physiological salt solutions / F. Horkay, I. Tasaki, P. J. Basser // Biomacromolecules. – 2000. – Vol. 1, N 1. – P. 84–90. <https://doi.org/10.1021/bm9905031>
13. Исследование сорбционных характеристик полимерных минерал-наполненных композитов для медицины / Ю. А. Игнатъева [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – Т. 5, № 93. – С. 52–56.
14. Шрамм, Г. Основы практической реологии и реометрии / Г. Шрамм. – М., 2003. – 312 с.

### References

1. Rogovina L. Z., Vasil'ev V. G., Braudo E. E. Definition of the concept of polymer gel. *Polymer Science, Series C*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 85–92. <https://doi.org/10.1134/s1811238208010050>
2. Osada Y., Gong J. P., Tanaka Y. Polymer gels. *Journal of Macromolecular Science*, 2004, vol. 44, no. 1, pp. 87–112. <https://doi.org/10.1081/mc-120027935>
3. Filippova O. E. Responsive polymer gels. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya C = Polymer Science, Series C*, 2000, vol. 42, no. 12, pp. 2328–2352.
4. Peppas N. A., Hilt J. Z., Khademhosseini A., Langer R. Hydrogels in biology and medicine: from molecular principles to bionanotechnology. *Advanced materials*, 2006, vol. 18, no. 11, pp. 1345–1360. <https://doi.org/10.1002/adma.200501612>
5. Abd El-Mohdy H. L. Radiation synthesis of nanosilver/poly vinyl alcohol/cellulose acetate/gelatin hydrogels for wound dressing. *Journal of Polymer Research*, 2013, vol. 20, no. 6, pp. 177–189. <https://doi.org/10.1007/s10965-013-0177-6>
6. Evsikova O. V., Starodubtsev S. G., Khokhlov A. R. synthesis, swelling, and adsorption properties of composites based on poly(acrylamide) gel and sodium bentonite. *Polymer Science. Series A*, 2002, vol. 44, no. 5, pp. 491–496 (in Russian).

7. Sokolov V. N. Clay rocks and their properties. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal* [Soros Educational Journal], 2000, vol. 6, no. 9, pp. 59–65 (in Russian).
8. Osipov V. I., Sokolov V. N. *Clays and their properties. Composition, structure and formation of properties*. Moscow, 2013. 576 p. (in Russian).
9. Vorobieva E. V., Krutko N. P., Basalyga I. I., Matrunchik Yu. V. Polymer complexes based on polyacrylic acid, polyethylene glycol and polyvinyl alcohol. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2008, no. 1, pp. 28–32 (in Russian).
10. Arndt K. F., Richter A., Ludwig S., Zimmermann J., Kressler J., Kuckling D., Adler H.-J. Poly(vinyl alcohol)/poly(acrylic acid) hydrogels: FT-IR spectroscopic characterization of crosslinking reaction and work at transition point. *Acta Polymerica*, 1999, vol. 50, no. 11–12, pp. 383–390. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1521-4044\(19991201\)50:11/12%3C383::aid-apol383%3E3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/(sici)1521-4044(19991201)50:11/12%3C383::aid-apol383%3E3.0.co;2-z)
11. De S. K., Aluru N. R., Johnson B., Crone W. C., Beebe D. J., Moore J. Equilibrium swelling and kinetics of pH-responsive hydrogels: models, experiments, and simulations. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, vol. 11, no. 5, pp. 544–555. <https://doi.org/10.1109/jmems.2002.803281>
12. Horkay F., Tasaki I., Basser P. J. Osmotic swelling of polyacrylate hydrogels in physiological salt solutions. *Biomacromolecules*, 2000, vol. 1, no. 1, pp. 84–90. <https://doi.org/10.1021/bm9905031>
13. Ignatieva Yu. A., Uspenskaya M. V., Borisov O. V., Olekhovich R. O., Evseev R. A., Kasanov K. N. Investigation of sorption characteristics of polymeric mineral-filled composites for medicine. *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics], 2014, vol. 5, no. 93, pp. 52–56 (in Russian).
14. Schramm G. *Fundamentals of practical rheology and rheometry*. Moscow, 2003. 312 p. (in Russian).

### Информация об авторе

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

### Information about the author

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

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

**БИОЛОГИЯ**  
**BIOLOGY**

UDC 598.2/9+574 (0423)476+576  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-685-693>

Received 26.05.2020  
Поступило в редакцию 26.05.2020

**Arseni A. Valnisty, Kanstantsin V. Homel, Ekaterina E. Kheidorova,  
Aleksey V. Shpak, Academician Mikhail E. Nikiforov**

*Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Bioresources,  
Minsk, Republic of Belarus*

**MOLECULAR GENETIC POLYMORPHISM OF AMERICAN MINK POPULATIONS  
(*NEOVISON VISON*) IN MODEL FUR FARMS AND ON THE ADJACENT  
TERRITORIES IN BELARUS**

**Abstract.** American mink (*Neovison vison*) is both a problematic invader and an economically valuable fur breed species in Belarus. The increasing scale of mink breeding for fur and the growing impact of this invasive species on the local ecosystems requires sound, novel strategies for managing both farm and wild populations. Containment of wild American mink populations under the effects of possible migration from the fur farms could be especially problematic. With that issue in mind, we have used microsatellite analysis to determine the genetic polymorphism in two color breeds of farm-bred American mink in the populations of several Belorussian model fur farms, as well as the same characteristics for the feral populations on the territories adjacent to said fur farms. We confirm the presence of effective influx of mink into the wild from fur farms, determined through the means of analyzing microsatellite genotype data of feral and farm populations.

**Keywords:** American mink, microsatellites, genetic structure, genetic polymorphism, invasive species, Belarus

**For citation:** Valnisty A. A., Homel K. V., Kheidorova E. E., Shpak A. V., Nikiforov M. E. Molecular genetic polymorphism of American mink populations (*Neovison vison*) in model fur farms and on the adjacent territories in Belarus. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 685–693. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-685-693>

**А. А. Волнистый, К. В. Гомель, Е. Э. Хейдорова, А. В. Шпак, академик М. Е. Никифоров**

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

**МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ ПОЛИМОРФИЗМ ПОПУЛЯЦИЙ АМЕРИКАНСКОЙ НОРКИ  
(*NEOVISON VISON*) В МОДЕЛЬНЫХ ЗВЕРОВОДЧЕСКИХ ХОЗЯЙСТВАХ  
И НА ПРИЛЕГАЮЩИХ К НИМ ТЕРРИТОРИЯХ В БЕЛАРУСИ**

**Аннотация.** Американская норка (*Neovison vison*) в Беларуси является одновременно проблематичным инвазивным и экономически значимым хозяйственным видом. Растущие масштабы хозяйственного разведения на мех и увеличивающееся воздействие этого вида на локальные экосистемы требует принятия надежной и последовательной стратегии менеджмента его диких и хозяйственных популяций. Этот подход поднимает проблематику контроля диких популяций американской норки в условиях потенциальной миграции особей в дикую среду из звероводческих хозяйств – встает вопрос наличия факта побегов особей в дикую среду в Беларуси. С целью разрешения этого вопроса мы осуществили генетический анализ двух хозяйственных популяций американской норки, а также диких групп на сопряженной со зверохозяйствами территории, используя в качестве генетических маркеров микросателлиты, чем подтвердили наличия эффективного потока особей в дикую среду из зверохозяйств, а также привели характеристики генетического полиморфизма для рассматриваемых популяций американской норки.

**Ключевые слова:** американская норка, микросателлиты, генетическая структурированность, генетический полиморфизм, инвазивные виды, Беларусь

**Для цитирования.** Молекулярно-генетический полиморфизм популяций американской норки (*Neovison vison*) в модельных звероводческих хозяйствах и на прилегающих к ним территориях в Беларуси / А. А. Волнистый [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 685–693 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-685-693>

**Introduction.** The American mink (*Neovison vison*, Schreber, 1777) is currently considered as both an economically-valuable and an invasive species in Belarus. Its invasion is sourced to multiple introduction pathways – including artificial releases of farm breeds into the wild in mid XX century, eastward spreading of feral populations from Poland, Ukraine and Baltic countries, and possible escapees from artificial fur farm populations [1].

Across Europe, the American mink (here and further on «*N. vison*») is classified as invasive species threatening the biodiversity and stability of various zoocenoses and preservation of multiple threatened species [2]. The most damning example being the role played by *N. vison* in the near extinction of the European mink *Mustela lutreola* (Linnaeus, 1761), the latter process being directly tied to uncontrolled spreading of *N. vison* [3–7]. It also acts as a carrier and natural reservoir for a number of diseases dangerous to the endemic wildlife. At the same time *N. vison* is an economically significant in Belarus, currently bred on multiple farms across the country for its valuable fur – a trade that shows no signs of declining locally in the foreseeable future.

This raises the concern of effective and ecologically-conscious breeding and management of this species in Belarus – presenting the perspective of controlling growth and expansion of *N. vison* populations in the wild for the sake of limiting its effects on the endemic fauna, all while carrying out structured, sustainable and effective mink fur breeding using novel approaches, such as genetic population management. A huge number of earlier studies on multiple other localities have, through the means of molecular genetic analysis (primarily STR (short tandem repeat) analysis), confirmed the source of feral American mink populations in fur farm escapees or their significant role in preventing efficient management of the wild populations [8; 9], but there is currently no clear consensus neither on the very existence of fur farm escapees among the feral populations of *N. vison* in Belarus in any significant numbers, nor on their capability to survive in local natural environments and bolster the numbers of feral populations and serve as the origin of new wild populations.

In this context, we have established this study's goals as determining the extent of genetic polymorphism for several color breeds of *N. vison* in model fur farms, and using the method and data to check the feral American mink populations on the adjacent territories for presence of genetic influx from the fur farms to determine if there is a continuous source of escapees which effectively adapt to the natural environments and reproductively contribute to the feral populations.

The characteristics of genetic polymorphism in artificial populations can be effectively used for controlled and sustainable breeding [10]. Establishing a method for molecular genotyping and genetic population analysis that is valid in relation to the local populations of the particular species serves to develop foundations for perspective efforts and applied measures towards more controlled breed maintenance and specimen exchange in breeding, as well as rational and effective population management for the invasive species in the wild. Verifying the presence of genetic influx into the feral *N. vison* populations from the fur farms serves to determine the optimal strategies and measures for management and control of this invasive species in Belarus [7; 11].

Here, we report successfully using STR analysis for genotyping two model fur farm populations of two colour breeds, as well as the wild populations inhabiting the territory adjacent to one of the said fur farms. We have obtained the characteristic of genetic polymorphism for the populations in question, and confirmed the presence of a significant genetic input of fur farm escapees in the wild population bordering the abovementioned fur farm.

**Materials and methods.** The study was conducted using the SSPA «SPC NAS of Belarus on Bioresources»'s bank of genetic samples, including samples gathered over the course of this study. We have focused our efforts on sampling two model fur farms – the Grodno fur farm in Strievka village of the Grodno Region, and Kalinkovichi fur farm in the Homiel region. This choice of study populations was based on the geographic factor – one fur farm was located in close vicinity with the sources of our main bulk of current wild specimen samples, while the other one was significantly distant from it, while both fur farms use the same source of breeding stock from one fur farm in Denmark. We were also interested in including at least two different colour breeds in the study. During the sampling we have ensured that all samples were individual, that the used wild specimen samples were gathered from individuals that conformed to the wild-type coloration characteristic of *N. vison* to prevent mistake introduced

by possible rare original escapees that did not verifiably mix with the local wild population. We also ensured, to the best of our ability, that wild individuals were not used in the breeding process on farms to prevent the mistake on that end. The primary collection included 110 samples, majority of them being ethanol-preserved muscle tissues from hunted wild individuals and slaughtered fur farm individuals. A total of 37 samples, all of them fecal, were excluded from the study due to their insufficient DNA quality, which surfaced on the stages of DNA extraction, amplification and genotyping. Our final collection for the analysis included 73 individual samples: 18 individuals from the wild populations, designated as a single «Wild» group in further analysis; 25 individuals from the Kalinkovichi fur farm of the «Brown» colour breed, designated as «Kalinkovichi Brown» group; 28 white individuals from Grodno fur farm, designated as «Strievka White» group, and 2 pearl individuals from Grodno fur farm, which were processed completely but largely excluded from the analysis results due to insufficient sample size. The samples are mapped in Fig. 1.

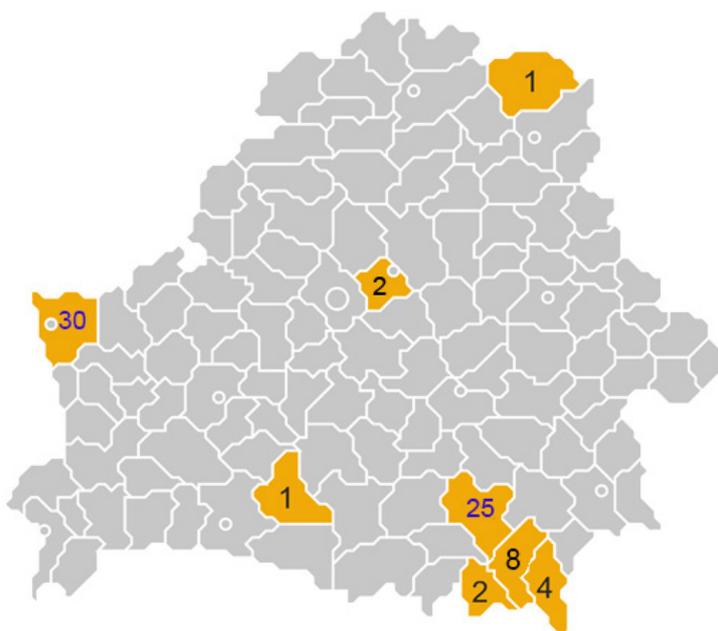


Fig. 1. Geographic distribution of *N. vison* samples used in this study across administrative districts of Belarus. Values reflect the number of used individual samples from that district. Values specifically in purple mark fur farm samples

While awaiting processing, the samples were preserved in 96 % ethanol, and stored in cryogenic conditions at  $\approx -80$  °C. Extracted DNA awaiting further processing was stored in Tris-EDTA elution buffer at  $\approx -80$  °C, with measures taken to minimize excessive freeze-thaw cycles.

DNA extraction from muscle tissue samples was performed using the «АртДНК» DNA extraction kit (ArtBioTekh, Belarus) according to manufacturer's instructions, with the lysis staged supplemented with additional 6 units of proteinase K (Primetech, Belarus), ending with a spectrophotometric DNA concentration measurement.

Fecal samples underwent DNA extraction with QIAmp DNA Stool Mini Kit (QIAGEN, Germany) following the manufacturer's protocol. Thermo Scientific IEC MicroCL 21R microcentrifuge, Biosan TDB-120 solid-body thermostat and Implen P330 nano spectrophotometer were employed in carrying out the procedures.

The microsatellite loci amplified for the analysis are listed in Table 1. Fifteen amplifications were joined into seven duplex reactions and a single uniplex reaction, carried out in a standard fashion for each of the 73 individual samples. The reaction arrangement was performed using the «Multiplex manager» software.

Primer panel was picked out of polymorphic loci successfully used in past studies, chosen according to the principles that would minimize introduced bias. Primers sequences were taken from the sources

**Table 1. List of STR loci employed for the microsatellite analysis of *N. vison* individuals, and the loci characteristics: «MP #» – the designated multiplex reaction number, «Ta» – primer annealing temperature determined through individual gradient PCR reactions, in °C, weight range is specified in base pairs and includes literature data expanded by outlier cases encountered in the study**

MP #	Locus ID	Repeat motif	Range, b. p.	Ta, °C	Source
1	Mvis 099	CA	300–360	60	[12]
	Mvi 586	GT	134–154	60	[13]
2	Mvi 4060	ACAAA	200–302	60	[14]
	Mvis 075	CA	90–140	60	[12]
3	Mvi 1302	GT	210–234	64	[15]
	Mvi 1321	CA	91–107	63.5	[15]
4	Mvi 111	GT	90–115	55	[13]
	Mvi 219	GC	164–180	52	[13]
5	Mvi 4001	(GTTTTT)2(TG)	225–236	60	[14]
	Mvi 1341	CA	148–176	59	[15]
6	Mvi 87	GC	76–123	56	[13]
	Mvi 232	GC	139–164	58	[13]
7	Mvi 114	CA	77–92	55	[13]
	Mvis 020	CA	170–190	60	[12]
8	Mvi 192	CA	130–145	60	[15]

according to table 1. Primers were synthesized by «Primetech» company (Belarus). OPC-purified primers were used. Direct primers were labeled with a By5 (Cy5 analogue) fluorescent dye on the 5' end. The optimal annealing temperatures and primer concentrations for each locus were determined experimentally in individual gradient PCR reactions, checked via ethidium bromide stained AGE. For the non-matching Ta's in a single duplex, the lowest Ta in a duplex was used. The final reaction were performed in 25 µl reactions of: 1X ammonium sulphate buffer; 0,2 mM of dNTPs, 1 unit of Taq polymerase (Primetech); 3 mM of MgCl<sub>2</sub>; 100 pmol of each primer; 5–40 ng of DNA template; and mQ water.

The protocol template for the amplification performed as follows: 5 min 95 °C; 40X cycles of 30 sec 95 °C, 30 sec Ta according to table 1 and 45 sec 72 °C; 15 min final extension at 72 °C; cooldown to 4 °C.

The amplifications were carried out using Biorad C1000 Touch amplifier.

The resulting PCR products were checked via ethidium bromide stained AGE in a 1.5 % agarose gel, employing 100 V current, a 15 cm horizontal phoresis chamber, pH 8,0 sodium borate buffer and Biorad MiniGel gel-documentation system.

Genotyping was performed via automatic laser fluorescence detection capillary PAGE using Beckman Coulter GeXP genetic analysis system employing reference size standard 600 and other standard consumables for the system. Raw data was analyzed using Fragment Analysis Tool from the GenomeLab GeXP Software Package v10.2 with manually optimized manufacturer settings and automatic peak detection to obtain individual allele sizes for each loci. Automatically detected peaks were checked manually. After the analysis was complete, 5 random individual samples were picked for a repeat genotyping to confirm reproducibility.

**Data analysis.** The individual allele size data was grouped into 4 population ( $n = 18$ ;  $n = 25$ ;  $n = 28$ ;  $n = 2$ ) units corresponding to their source as mentioned above.

Allele size binning was performed using TANDEM v 1.09 software. Binned data was converted for diverging analysis formats using CONVERT v 1.3.1 software and analyzed for null alleles and spurious peaks using Micro-Checker v 2.2.

Cluster analysis was performed using STRUCTURE 2.3.4 with the following setting: admixture model population, IDs used as geographic localities; infer  $\alpha$ ; prior  $\alpha = 1,0$ ; individual  $\alpha$  for each population; equal prior  $\alpha$  for every population; upper  $\alpha$  threshold = 10,0; standard deviation for updated  $\alpha$  values = 0,025; correlating allele frequencies between populations; infer varying Fst value for different subpopulations; prior median probability of Fst value for populations = 0,01; prior standard deviation of

**Table 2. Genetic polymorphism characteristics of studied Belarusian *N. vison* populations according to microsatellite data**

Locus	Population																	
	Wild					Strievka White					Kalinkovichi Brown							
	HWE	Na	Ar	Fis	Ho	He	HWE	Na	Ar	Fis	Ho	He	HWE	Na	Ar	Fis	Ho	He
Mvi 1302	0.0000	6	4.6	0.4720	0.2941	0.5490	0.0000	12	8.3	0.2184	0.6296	0.8022	0.0960	10	7.5	0.2011	0.6364	0.7928
Mvi 219	0.0260	5	4.3	0.1375	0.5882	0.6791	0.9860	6	6.0	0.1318	0.7143	0.8208	0.9810	19	14.4	-0.0213	0.9600	0.9404
Mvi 1321	0.9200	7	6.5	-0.1223	0.9444	0.8444	0.1000	8	6.3	0.2486	0.5556	0.7359	0.0760	9	7.4	0.1472	0.6667	0.7793
Mvi 4060	1.0000	2	1.7	0.0000	0.0555	0.0556	NA	1	1.0	NA	NA	NA	NA	1	1.0	NA	NA	NA
Mvis 099	0.0000	11	8.2	0.4983	0.4615	0.9015	0.5630	10	8.1	0.0157	0.7857	0.7981	0.6860	10	7.5	-0.0939	0.8333	0.7633
Mvi 114	0.0240	9	7.0	-0.0193	0.7777	0.7635	0.0140	6	4.8	0.3994	0.4286	0.7084	0.2140	5	4.5	0.0417	0.7083	0.7385
Mvi 4001	0.0800	6	4.6	0.1429	0.3750	0.4355	0.0000	7	5.4	0.4841	0.3214	0.6175	0.7660	5	4.5	0.1570	0.6500	0.7680
Mvi 1341	0.0970	7	6.2	-0.0467	0.8235	0.7879	0.9960	9	7.3	-0.0649	0.8571	0.8058	0.0810	8	6.7	0.1709	0.6087	0.7314
Mvi 586	0.0100	7	6.1	0.3411	0.5555	0.8349	0.0170	9	7.0	-0.1015	0.8889	0.8085	0.8970	8	6.7	-0.1743	0.9583	0.8192
Mvi 192	0.2260	9	7.7	-0.0387	0.8333	0.8032	0.0000	9	7.0	0.2489	0.6296	0.8344	0.1450	8	6.5	0.2653	0.5455	0.7378
Mvi 111	0.0100	8	6.9	0.1299	0.7222	0.8270	0.9970	6	5.5	-0.1262	0.7143	0.6357	0.1180	7	4.6	0.1365	0.4583	0.5293
Mvis 020	0.0000	8	6.3	0.6958	0.2222	0.7159	0.0000	7	6.2	0.4343	0.3929	0.6890	0.0000	7	4.8	0.9338	0.0500	0.7372
Mvi 232	0.1610	6	5.1	0.0685	0.5555	0.5952	0.9030	6	5.6	-0.0847	0.8214	0.7584	1.0000	7	5.9	-0.1134	0.7917	0.7128
Mvis 075	0.3400	7	6.6	-0.0730	0.8888	0.8302	0.1660	10	7.0	0.0494	0.7407	0.7785	0.9910	8	7.4	-0.0813	0.9200	0.8522
Mvi 87	0.0000	7	5.8	0.7807	0.1666	0.7429	0.9950	4	4.0	0.1489	0.6429	0.7533	0.0000	5	4.4	0.9458	0.0417	0.7527
Mean	0.0000	7.0	5.8	0.1787	0.5510	0.6910	0.0000	7.8	6.0	0.1190	0.6516	0.7533	0.0020	8.3	6.3	0.1531	0.6306	0.7610

**Notes:** HWE – *p*-value for Hardy–Weinberg disequilibrium, values < 0.05 are highlighted with bold type; Na – number of alleles; Ar – allelic richness; Fis – Wright’s inbreeding coefficient; Ho – observed heterozygosity; He – expected heterozygosity.

Fst value for populations = 0,05; Markov Chain dememorization steps = 20000; MCMC iterations = 50000; K range from 1 to 6, with 20 iterations for every K value.

AMOVA and genetic polymorphism characteristics were calculated in Arlequin 3.5 with default settings. Determining of deviation from HWE (Hardy-Weinberg Equilibrium) and calculation of inbreeding coefficient were carried out with diveRsity 1.9.90 for R. Factorial correspondence analysis was carried out using Genetix v 4.05.2 with 4 factors on default settings. Migration network was calculated using divMigrate for Rusing model Nm with 95% confidence interval.

**Results.** A total of 73 individual American mink samples was genotyped using 15 microsatellite loci. All loci aside from Mvi 4060 were polymorphic across all population units. Out of 75 allele sizes obtained repeatedly for reproducibility confirmation, only 1 diverged meaningfully from the original result, which was deemed to be an acceptable error rate. Null allele checking using Micro-Checker showed possible null alleles, specifically for locus Mvis 099, but null allele probability did not exceed 0,15 so we decided not to exclude this locus from the analysis.

Summary results on the populations' genetic polymorphism are shown in Table 2. The «Strievka Pearl» population group was excluded from the summary due to unreliable results caused by insufficient sample size ( $n = 2$ ). Most loci displayed different HWE disequilibrium significance across different population units, but Fisher's method sum across all loci indicates clear HWE disequilibrium due to homozygote excess. The lowest molecular variety was characteristic of the «Wild» population group.

AMOVA results show that inter-population variance accounts for 9.21 % ( $p = 0,000$ ) of overall variance in the sample. Most of the sample's variance (75.98 %) is caused by inter-individual variance.

Population structure analysis via STRUCTURE (Fig. 2) presented us with a clear population structure for the most likely  $K = 3$  (optimal  $\Delta K = 48,534$ ).

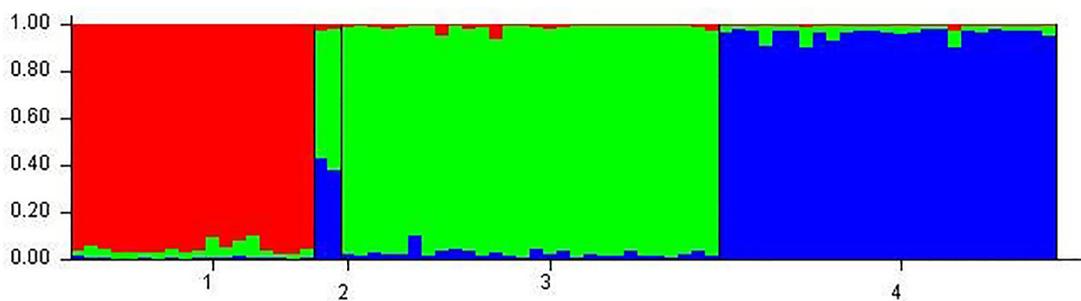


Fig. 2. Bar diagram of individual clustering for the studied sample of *N. vison* constructed in STRUCTURE for  $K = 3$  using microsatellite data. Individuals' origin among the population units displayed along the x-axis: 1 – «Wild»; 2 – «Strievka Pearl»; 3 – «Strievka White»; 4 – «Kalinkovichi Brown»

Factorial correspondence analysis performed in Genetix has shown a relatively smaller genetic distance between all fur farm individuals, but also a closer relation of «Wild» population unit members with both farm populations, rather than with other «Wild» individuals from the more distant regions (Fig. 3).

Migration network, assembled using divMigrate (Fig. 4) demonstrates a significant presence of migration from the population unit «Kalinkovichi Brown» into the «Wild» population unit, as well as possible various levels of migration from the unit «Strievka Pearl» into all other population units.

**Discussion.** The «Strievka Pearl» population unit was rejected from consideration due to severely lacking sample size, leading to unreliable results regarding this group in most analyses.

The observed deviation from HWE due to homozygote excess in all studied *N. vison* population units is consistent with the expectations due to inbreeding employed for breed maintenance regarding the farm populations, and due to Wahlund effect in the wild population. Genetic polymorphism characteristics display a lower heterozygosity, allele count, allele richness, and higher inbreeding coefficient compared to similar populations studied across Europe, including ones using highly similar microsatellite panels and sample sizes – which is likely caused by a smaller breeding stock and smaller population size across Belarus for farm and wild populations both. Significantly lower genetic polymorphism of

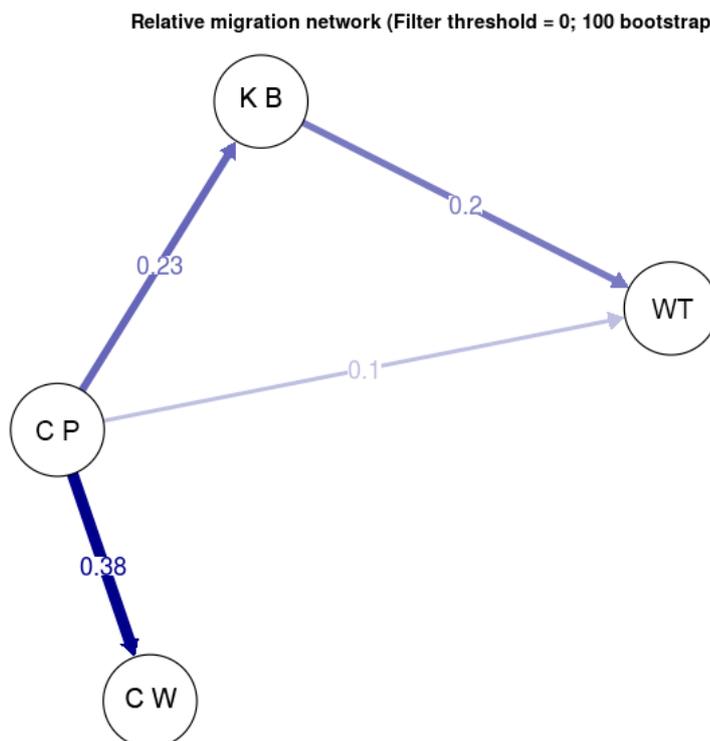


Fig. 3. 3D diagram of genetic relations between *N. vison* individuals according to factorial correspondence analysis utilizing microsatellite data. Yellow cubes correspond to «Wild» population unit members; blue cubes – to «Strievka Pearl»; white cubes – «Strievka White»; grey cubes – «Kalinkovichi Brown». Individuals marked as 2-1 and 16-1 for the «Wild» population unit are of a particular interest, as they correspond to individuals TH00295 (Vitebsk region) and TH00616 (Brest region)

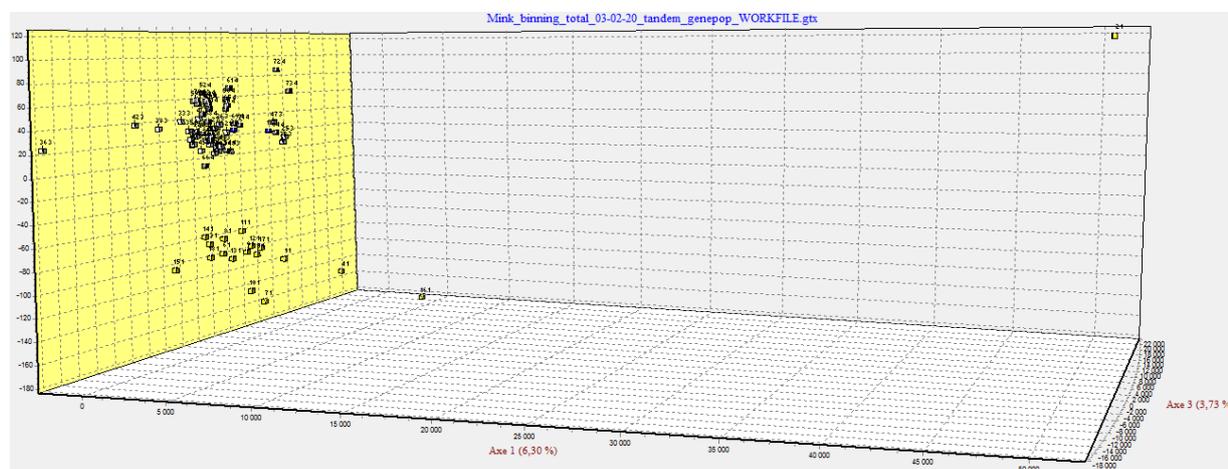


Fig. 4. Migration network of studied *N. vison* population units assembled with divMigrate according to the microsatellite data. The «WT» circle represents the «Wild» population unit; «CP» – «Strievka Pearl»; «CW» – «Strievka White»; «KB» – «Kalinkovichi Brown». Blue arrows and values on them represent migration flow

wild populations compared to farm populations reflects a nearly universal trend for *N. vison* populations beyond its historic range in North America [15]. The clustering of «Strievka White» and «Kalinkovichi Brown» units in factorial correspondence analysis originates in the closely related sources of breeding stock used for both fur farms populations, procured from a certain mink farm in Denmark, differing only by their color breeds. The fact that populations displayed a perfectly clustered population structure serves to validate the used method and particularly the STR panel for determining the population affiliation of individuals. This shows method’s potential application in mink breeding, particularly for controlling and certifying breeding stock for transactions, as long as a sufficiently large samples of relevant

populations are available – which should not be an issue considering regular slaughtering of the farmed animals. Noticeably, none of the studied farm populations show any indicators of significant inbreeding depression through their genetic polymorphism characteristics, indicating that the breeds should be stable in the foreseeable future, given the current breed management strategy is maintained.

A very likely presence of a stable gene flow from Kalinkovichi fur farm into the wild is indicated by migration and factorial analyses. A certain degree of relatedness can be inferred from the species' invasion history, but this explanation is not supported by isolation of wild individuals harvested in Homiel region from the wild individuals of other regions according to factorial correspondence analysis. Population structure analysis indicated that all these individuals still belong to the same population unit, suggesting that differences among the wild individuals from different regions are unlikely to be due to isolation between wild subpopulations. It can be suggested that wild individuals could be related due to common ancestry from the invasion period [16], and later diverged due to migration from Lithuanian wild population, but this explanation is not supported by the results of migration analysis. Presence of accidental original escapees among wild individuals from Homiel is extremely unlikely due to all said individuals displaying wild type fur coloration, as well as due to the results of population structure analysis. Same results also suggest that, whatever is the extent of migration from the fur farm into the wild, escapees do not form the core of wild population unit in the Homiel region. Beyond that it's hard to determine the scale of migration from the fur farm due to lack of chronological depth in the analysis. What can be concluded is that individual minks almost certainly do escape from the Kalinkovichi fur farm, successfully adapt to the wild conditions and produce mixed offspring with local individuals that persists in the wild. Without a thorough survey, the actual scale of escapes can only be speculated on, since there can be an unknown number of escapees that fail to adapt and produce offspring due to various factors. Even migration of a minimal scale is troubling – past studies have shown that *N. vison* displays capacity to form rapidly expanding populations in the wild from a minimal pool of fur farm escapees in conditions quite similar to those present in most regions of Belarus [17]. Presence of a stable migration flow from the fur farms can drastically reduce the effect of measures that could be taken to control and manage growth and expansion of wild populations of American mink in Belarus, making expensive efforts futile as long as the flow from the fur farms is not taken into consideration and mitigated in one way or another. This is especially problematic as Belarus serves as the main land invasion corridor for American mink to expand eastward into the regions inhabited by the last surviving wild populations of European mink in Western Russia [18]. Continuous growth of wild American mink population with an uncontrolled conduit of individuals from various breeding farms across the globe through Belarussian fur farms and into the wild serves as a major threat to the local veterinarian security, as it threatens with establishment of a stable reservoir of numerous mink pathogens, dangerous to endemic wildlife, mink farm breeding operations, and humans. Any perspective strategy to manage and contain the rapidly growing *N. vison* population in Belarus must necessarily include element of genetic monitoring to control for fur farm escapee role in forming and maintaining the local wild populations, as well as timely and effective measures to restrict the flow of individuals from fur farms into the wild. A perspective genetic study focusing on a larger sample of wild *N. vison* individuals from more varied localities presents a valuable opportunity for an attempt to predict the future dynamic of *N. vison* population in Belarus according to its genetic variance using such means as population viability analysis.

**Conflict of interests.** Authors declare no conflict of interests.

**Acknowledgements.** We extend gratitude to Victor Demyanchik and Alexandra Larchenko for their assistance in sample harvesting efforts for this study. This research was conducted with the support of Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant B18-126).

## References

1. Serzhanin I. *Mammals of Belorussia*. Minsk, 1961. 330 p (in Russian).
2. Genovesi P., Scalera R., Brunel S. *Towards an early warning and information system for invasive alien species (IAS) threatening biodiversity in Europe*. Available at: <http://dx.publications.europa.eu/10.2800/4167> (accessed 20.05.19).
3. Zuberogoitia I., Zalewska H., Zabala J., Zalewski A. The impact of river fragmentation on the population persistence of native and alien mink: an ecological trap for the endangered European mink. *Biodiversity and Conservation*, 2013, vol. 22, no. 1, pp. 169–186. <https://doi.org/10.1007/s10531-012-0410-3>

4. Sidorovich V. E., Polozov A. G., Zalewski A. Food niche variation of European and American mink during the American mink invasion in north-eastern Belarus. *Biological Invasions*, 2010, vol. 12, no. 7, pp. 2207–2217. <https://doi.org/10.1007/s10530-009-9631-0>
5. Hegyeli Z., Kecskés A. The occurrence of wild-living American Mink *Neovison vison* in Transylvania, Romania. *Small Carnivore Conservation*, 2014, vol. 51, pp. 23–28.
6. Zalewski A., Michalska-Parda A., Bartoszewicz M., Kozakiewicz M., Brzeziński M. Multiple introductions determine the genetic structure of an invasive species population: American mink *Neovison vison* in Poland. *Biological Conservation*, 2010, vol. 143, no. 6, pp. 1355–1363. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.03.009>
7. Fraser E. J., Lambin X., Travis J. M. J., Harrington L. A., Palmer S. C. F., Bocedi G., Macdonald D. W. Range expansion of an invasive species through a heterogeneous landscape – the case of American mink in Scotland. *Diversity and Distributions*, 2015, vol. 21, no. 8, pp. 888–900. <https://doi.org/10.1111/ddi.12303>
8. Hammershoj M., Pertoldi C., Asferg T., Møller T. B., Kristensen N. B. Danish free-ranging mink populations consist mainly of farm animals: Evidence from microsatellite and stable isotope analyses. *Journal for Nature Conservation*, 2005, vol. 13, no. 4, pp. 267–274. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2005.03.001>
9. Genovesi P., Carnevali L., Alonzi A., Scalera R. Alien mammals in Europe: updated numbers and trends, and assessment of the effects on biodiversity. *Integrative Zoology*, 2012, vol. 7, no. 3, pp. 247–253. <https://doi.org/10.1111/j.1749-4877.2012.00309.x>
10. Beuzen N. D., Stear M. J., Chang K. C. Molecular markers and their use in animal breeding. *Veterinary Journal*, 2000, vol. 160, no. 1, pp. 42–52. <https://doi.org/10.1053/tvj.2000.0468>
11. Tobin P. C. Managing invasive species. *F1000Research*, 2018, vol. 7, p. 1686. <https://doi.org/10.12688/f1000research.15414.1>
12. Fleming M. A., Ostrander E. A., Cook J. A. Microsatellite markers for American mink (*Mustela vison*) and ermine (*Mustela erminea*). *Molecular Ecology*, 1999, vol. 8, no. 8, pp. 1352–1355. [https://doi.org/10.1046/j.1365-294x.1999.00701\\_2.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-294x.1999.00701_2.x)
13. O'Connell M., Wright J. M., Farid A. Development of PCR primers for nine polymorphic American mink *Mustela vison* microsatellite loci. *Molecular Ecology*, 1996, vol. 5, no. 2, pp. 311–312. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.1996.tb00320.x>
14. Anistoroaei R., Farid A., Benkel B., Cirera S., Christensen K. Isolation and characterization of 79 microsatellite markers from the American mink (*Mustela vison*). *Animal Genetics*, 2006, vol. 37, no. 2, pp. 185–188. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2006.01429.x>
15. Vincent I. R., Farid A., Otieno C. J. Variability of thirteen microsatellite markers in American mink (*Mustela vison*). *Canadian Journal of Animal Science*, 2003, vol. 83, no. 3, pp. 597–599. <https://doi.org/10.4141/a03-001>
16. Bifulchi A., Picard D., Lemaire C., Cormier J. P., Pagano A. Evidence of admixture between differentiated genetic pools at a regional scale in an invasive carnivore. *Conservation Genetics*, 2010, vol. 11, no. 1, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10592-008-9780-1>
17. Fraser E. J., Macdonald D. W., Oliver M. K., Piertney S., Lambin X. Using population genetic structure of an invasive mammal to target control efforts – An example of the American mink in Scotland. *Biological Conservation*, 2013, vol. 167, pp. 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.07.011>
18. Skumatov D. *European mink in Russia: Contemporary situation and preservation perspectives under hunting conditions*. Kirov, 2005. 161 p. (in Russian).

### Information about the authors

*Valnisty Arseni A.* – Junior researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Bioresources (27, Akademisheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volnisty.aa@yandex.ru.

*Homel Kanstantsin V.* – Ph. D. (Biology), Leading researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Bioresources (27, Akademisheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: homelkv@gmail.com.

*Kheidorova Ekaterina E.* – Ph. D. (Biology), Leading researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Bioresources (27, Akademisheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hejkat@mail.ru.

*Shpak Aleksey V.* – Senior researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Bioresources (27, Akademisheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shpak.dvergr@gmail.com.

*Nikiforov Mikhail E.* – Academician, D. Sc. (Biology), Professor, Head of the Laboratory. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Bioresources (27, Akademisheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nikif@tut.by.

### Информация об авторах

*Волнистый Арсений Андреевич* – мл. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: volnisty.aa@yandex.ru.

*Гомель Константин Вячеславович* – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: homelkv@gmail.com.

*Хейдорова Екатерина Эдуардовна* – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: hejkat@mail.ru.

*Шпак Алексей Викторович* – ст. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shpak.dvergr@gmail.com.

*Никифоров Михаил Ефимович* – академик, д-р биол. наук, профессор, заведующий лабораторией. НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nikif@tut.by.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 581.198:582.263:577.151

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-694-701>

Поступило в редакцию 04.06.2020

Received 04.06.2020

**И. А. Ильючик, В. Н. Никандров***Полесский государственный университет, Пинск, Республика Беларусь***О ПРОТЕОЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ СУБКЛЕТОЧНЫХ ФРАКЦИЙ КЛЕТОК  
*CHLORELLA VULGARIS* ШТАММА *C 111 IBCE C-19****(Представлено академиком В. Н. Решетниковым)*

**Аннотация.** Установлено, что выделенные методом дифференциального центрифугирования и в градиенте плотности сахарозы субклеточные частицы клетки *Chlorella vulgaris* штамма *C 111 IBCE C-19* способны расщеплять казеин, желатин, фибриноген и гемоглобин при pH 7,4 и 9,0. С использованием группоспецифических ингибиторов протеиназ выявлено присутствие в клетках хлореллы сериновых, цистеиновых и металлопротеиназ. Однако выявление этого набора протеолитических энзимов возможно лишь при использовании в качестве субстратов нескольких разных белков. В отдельных случаях практически весь использованный арсенал группоспецифических ингибиторов протеиназ оказался малоэффективен. Это дает основания полагать, что существуют протеиназы иного плана, чем перечисленные выше, что требует дальнейших исследований в перспективе.

**Ключевые слова:** хлорелла, субклеточные фракции, расщепление белков субстратов, группоспецифические ингибиторы

**Для цитирования.** Ильючик, И. А. О протеолитической активности субклеточных фракций клеток *Chlorella vulgaris* штамма *C 111 IBCE C-19* / И. А. Ильючик, В. Н. Никандров // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 694–701. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-694-701>

**Irina A. Ilyuchyk, Vitaliy N. Nikandrov***Polesky State University, Pinsk, Republic of Belarus***ON PROTEOLYTIC ACTIVITY OF SUBCELLULAR FRACTIONS  
OF *CHLORELLA VULGARIS* STRAIN *C 111 IBCE C-19* CELL***(Communicated by Academician Vladimir N. Reshetnikov)*

**Abstract.** Subcellular particles of *Chlorella vulgaris* C 111 IBCE C-19 were isolated by differential centrifugation in sucrose density gradient. It was stated for the first time, that these particles can cleave casein, gelatin, fibrinogen and hemoglobin at pH 7.4 and 9.0. Using group-specific proteinase inhibitors, a set of serine-, cysteine- and metalloproteinases was identified in this material. However, the detection of this set of proteolytic enzymes is only possible when several different proteins are used as substrates. In some cases, virtually all of the used arsenal of group-specific proteinase inhibitors proved to be little effective. This suggests that these are proteinases of a different nature than those listed above, which requires further perspective research.

**Keywords:** chlorella, subcellular fractions, protein substrates cleavage, group-specific inhibitors

**For citation:** Ilyuchyk I. A., Nikandrov V. N. On proteolytic activity of subcellular fractions of *Chlorella vulgaris* strain *C 111 IBCE C-19* cell. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 694–701 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-694-701>

**Введение.** Одной из наиболее актуальных проблем современности является обеспечение растущего народонаселения и сельскохозяйственных животных достаточным количеством белка. По данным экспертов проекта «Протеин России», недостаток кормовых белков составляет 770 тыс. т, а общий дефицит белков в России – 2 млн т/год. Ликвидировать дефицит белка, лишь расширяя посевные площади или увеличивая поголовье скота стало невозможно, что выдвигает проблему поиска альтернативных источников белка [1].

Это породило в биотехнологии направления так называемого одноклеточного белка. Среди продуцентов белка заметное место занимают одноклеточные водоросли, в том числе рода

*Chlorella*. США, Япония, Китай, Тайвань и Индонезия производят более 2,5 тыс. т высушенной хлореллы в год [2]. Она является одним из перспективных возобновляемых ресурсов органического сырья [3].

Интенсификация технологии получения биомассы хлореллы настоятельно диктует необходимость уяснения биологии этого продуцента и, в частности, систем регуляции метаболизма и жизнедеятельности.

Одним из генеральных механизмов такой регуляции является протеолиз. О протеолитической системе хлореллы данные мировой литературы практически отсутствуют.

Ранее нами было показано, что осветленные гомогенаты клеток *Chlorella vulgaris* расщепляют ряд белков субстратов [4; 5]. В краткой тезисной форме были также изложены результаты исследования протеолитической активности клетки хлореллы [6]. Однако они не позволяют оценить особенности организации системы внутриклеточного протеолиза *Chlorella vulgaris*.

Цель настоящего исследования – раскрыть особенности проявления протеолитической активности субклеточными фракциями клетки *Chlorella vulgaris*.

**Материалы и методы исследования.** Исследования выполнены на альгологически чистом штамме *Chlorella vulgaris* C III IBCE C-19, полученном из коллекции водорослей Института биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси и любезно предоставленном сотрудниками института.

В работе использовали желатин свиньи (Fluka, Германия), гемоглобин быка, фибриноген человека, диизопропилфторфосфат (Sigma, США), фенилметилсульфонилфторид, диэтилдитиокарбамат, *p*-хлормеркурибензоат (Carl Roth, Германия), 1,10-фенантролин, этилендиаминтетрацетат (Alfa Aesar, Германия), 8-оксихинолин (Chem-impex, Германия), бактоагар (Melford, США), кумасси ярко-голубой G-250 (Appli Chem, Германия), казеин по Гаммерстену и остальные реактивы были производства стран СНГ марки «хч».

Микроводоросль выращивали в условиях периодической культуры на среде Tamiya как описано ранее [4]. В фазу логарифмического роста на 7-е сутки культивирования, используя камеру Горяева, отбирали аликвоты культуры по  $100 \pm 4,70$  млн клеток, трижды отмывали от культуральной среды дистиллированной водой, центрифугируя в течение 20 мин при 3000 об/мин. Клетки замораживали и хранили при  $-20$  °С.

Клетки *Ch. vulgaris* разрушали в гомогенизаторе Поттера–Эльвейема при 4 °С в 0,5 мл 0,25 М растворе сахарозы [7] в течение 5 мин.

Субклеточные фракции выделяли методом дифференциального центрифугирования. При 30 г в течение 15 мин осаждали обрывки клеток. Фракцию ядер отделяли центрифугированием при 400 г в течение 20 мин, фракцию пластид – при 6000 г в течение 20 мин, фракцию митохондрий – при 20000 г в течение 15 мин.

Осадок ядер отмывали дважды с 6 мл 0,25 М сахарозы и центрифугировали при 800 г в течение 10 мин. Очищенные ядра сохраняли на льду. Очистку хлоропластов проводили центрифугированием, используя ступенчатый градиент сахарозы: 51, 35 и 25 % сахарозы, центрифугировали при 4000 г в течение 30 мин. Очистку митохондрий – в ступенчатом градиенте сахарозы: 60, 47, 35 и 25 % сахарозы, центрифугировали при 24000 г в течение 10 мин [8; 9].

Все исследования с органеллами проводили при температуре 4 °С в тот же день.

Качество и чистоту полученных органелл оценивали на основании целостности морфологических структур при помощи световой микроскопии, а также с помощью красителей, как описано в [10]. Полученные после очистки ядра, пластиды и митохондрии разрушали в 0,2 мл раствора 0,25 М сахарозы при 4 °С в течение 1–2 мин.

Концентрацию общего белка в гомогенатах органелл клеток хлореллы и супернатанте определяли колориметрическим методом [11].

Протеолитическую активность полученных гомогенатов ядер, пластид, митохондрий и супернатанта определяли по лизису белков в тонком слое агарового геля как подробно описано ранее [12]. В качестве растворителя при приготовлении белок-агаровых пластин использовали 0,05 М Tris-HCl буфер pH 7,4 или 9,0.

Все растворы в данном эксперименте готовили на бидистиллированной воде. Диизопропил-фторфосфат, фенилметилсульфонилфторид и 8-гидроксихинолин растворяли в 50 %-ном этаноле. Конечная концентрация ингибиторов составляла  $10^{-3}$  М.

Исследования проведены шестикратно. Полученные результаты обработаны статистически с использованием программы Statistica 6.0. Достоверность различий между вариантами определяли с учетом коэффициента Стьюдента ( $t$ ) для принятого уровня значимости ( $p \leq 0,05$ ).

**Результаты и их обсуждение.** Установлено, что все субклеточные фракции клеток хлореллы обладали протеолитической активностью и расщепляли все использованные белки субстраты при обоих значениях рН (таблица). Учитывая концентрацию белка в образцах субклеточных фракций (мкг/мл): ядер –  $695,57 \pm 0,44$ ; пластид –  $719,73 \pm 0,22$ ; митохондрий –  $286,23 \pm 5,50$ ; супернатанта –  $48,33 \pm 3,13$  становится ясно, что наиболее высокая удельная активность присуща фракции супернатанта.

**Протеолитическая активность (мм<sup>2</sup> площади зон лизиса белков) субклеточных фракций *Chlorella vulgaris* ( $n = 6$ )**

**Proteolytic activity (protein lysis zone area, mm<sup>2</sup>) of subcellular particles *Chlorella vulgaris* ( $n = 6$ )**

Растворитель Solvent	Площадь зон лизиса, мм <sup>2</sup> Lysis zone area, mm <sup>2</sup>							
	рН 7,4				рН 9,0			
	Я	Пл	Мх	Сн	Я	Пл	Мх	Сн
<i>Гемоглобин</i>								
H <sub>2</sub> O	51,25 ± 2,11	50,96 ± 1,41	50,64 ± 1,40	59,01 ± 2,25	69,52 ± 0,63	68,69 ± 2,38	94,43 ± 4,10	66,01 ± 2,40
+ этанол, 25 %	18,64 ± 0,98*	79,84 ± 3,56*	54,95 ± 1,07	11,13 ± 0,71*	53,63 ± 1,40*	172,01 ± 6,49*	91,75 ± 3,61	109,77 ± 1,52*
<i>Желатин</i>								
H <sub>2</sub> O	76,38 ± 2,38	60,99 ± 1,44	66,46 ± 2,31	66,59 ± 1,75	97,73 ± 1,87	39,49 ± 0,63	35,56 ± 1,38	59,78 ± 0,97
+ этанол, 25 %	80,93 м ± 1,01	56,36 м ± 2,14	44,29 м ± 2,55*	55,94 ± 0,85*	60,38 ± 0,62*	38,00 ± 1,80	32,07 ± 0,95	73,80 ± 1,78*
<i>Казеин</i>								
H <sub>2</sub> O	149,35 ± 2,61	103,93 м ± 5,20	77,32 м ± 3,65	99,16 ± 3,08	78,03 ± 2,49	75,52 ± 2,44	47,73 ± 3,20	59,00 ± 2,25
+ этанол, 25 %	149,35 м ± 1,94	60,17 м ± 3,41*	73,95 м ± 2,60	95,72 ± 2,67	78,03 ± 1,98	94,20 ± 4,30*	28,89 ± 3,31*	25,51 ± 1,96*
<i>Фибриноген</i>								
H <sub>2</sub> O	65,72 ± 1,74	68,03 ± 2,09	93,51 ± 2,14	61,96 ± 4,05	62,17 ± 1,41	82,91 ± 2,38	93,40 ± 0,86	55,79 ± 0,52
+ этанол, 25 %	67,65 ± 0,96	84,26 ± 1,83*	124,93 ± 5,86*	67,72 ± 1,63	93,30 ± 4,04*	87,48 ± 4,28	151,78 ± 8,49*	76,60 ± 2,77*

Примечание: Я – ядра, Пл – пластиды, Мх – митохондрии, Сн – супернатант; \* – здесь и далее изменения статистически достоверны,  $p \leq 0,05$ .

Note: Я – cores, Пл – plastids, Мх – mitochondria, Сн – supernatant; \* – hereinafter the changes are statistically significant,  $p \leq 0.05$ .

Оказалось, что при рН 7,4 наиболее интенсивно протеиназы фракций расщепляли казеин. Исключением стала фракция митохондрий, протеиназы которой проявили наиболее высокую активность при расщеплении фибриногена. Во всех случаях гемоглобин как субстрат подвергался наименьшему протеолизу.

Ситуация существенно менялась при рН 9,0. В щелочной среде протеиназы ядер наиболее интенсивно расщепляли желатин, а хуже всего – фибриноген. Протеиназы пластид при этом рН проявили наибольшую активность при использовании в качестве субстрата фибриногена, а самую низкую – в случае желатина. Фракции митохондрий и супернатанта проявили наибольшую протеолитическую активность на гемоглобине, а минимальную – на желатине и фибриногене соответственно.

Далее оказалось, что в присутствии этанола в целом ряде случаев протеолитическая активность снижалась при pH 7,4 на 33,36–81,14 % (особенно в супернатанте при лизисе гемоглобина), тогда как при pH 9,0 угнетение активности составило 38,22–56,76 % (также наиболее заметно в случае супернатанта, но при расщеплении казеина).

Однако в целом ряде случаев частичное замещение воды этанолом сопровождалось ростом протеолитической активности. Особенно часто такие явления наблюдались при pH 9,0. Так, расщепление гемоглобина пластидами в присутствии этанола возрастало в 2,5 раза. В остальных пяти случаях литическая активность протеиназ супернатанта, пластид и митохондрий увеличилась на 23,45–66,29 %.

Причины этого нуждаются в дальнейшем исследовании, выходящем за рамки данного сообщения. Можно лишь отметить, что ранее на очищенных образцах протеиназ был продемонстрирован существенный рост фибринолитической активности при частичном замещении воды органическими растворителями [13]. Кроме того, при исследовании протеолитической активности образцов белковых ингибиторов протеиназ в отдельных случаях было установлено появление протеолитической активности в присутствии этанола [14].

Материалы таблицы свидетельствуют о представительстве в каждой из внутриклеточных структур клетки хлореллы нескольких протеиназ.

Характеризуя в целом эффекты группоспецифических ингибиторов (рисунок), следует отметить довольно сложную, пеструю и неоднозначную картину сдвигов расщепления белков субстратов. При этом выявленные изменения активности зависели не только от фракции субклеточных частиц, но и от белка субстрата.

Активность так называемых нейтральных протеиназ (pH 7,4) ядер по большинству белков субстратов была малочувствительна к использованным ингибиторам. Так, расщепление казеина и желатина угнеталось не более, чем на 16,35 %, а фибриногена – в пределах 36 % и только в присутствии диэтилдитиокарбамата (DEDTC), фенолметилсульфонилфторида (PMSF), *p*-хлормеркурибензоата (*p*-CMB), и 8-гидроксихинолина (8-hQui). И лишь расщепление гемоглобина полностью подавляли последние три ингибитора, угнетали на 57–89 % диизопропилфторфосфат (DFP), *o*-фенантролин (*o*-phe), DEDTC и слабо – ЭДТА.

Казеинолитическую активность пластид на 59 % подавлял DFP, практически не изменяли *p*-CMB, PMSF, ЭДТА и 8-hQui. Остальные эффекторы угнетали активность не более чем на 35 %. Близкая картина выявлена и при расщеплении желатина с той лишь разницей, что эффект *p*-CMB составил 36 %. В отличие от этого, расщепление фибриногена подавлялось на DFP и на *p*-CMB на 45 и 85 % соответственно. На гемоглобинолитическую активность не действовал лишь ЭДТА. Она на 85 % угнеталась *p*-CMB, а остальными ингибиторами – полностью.

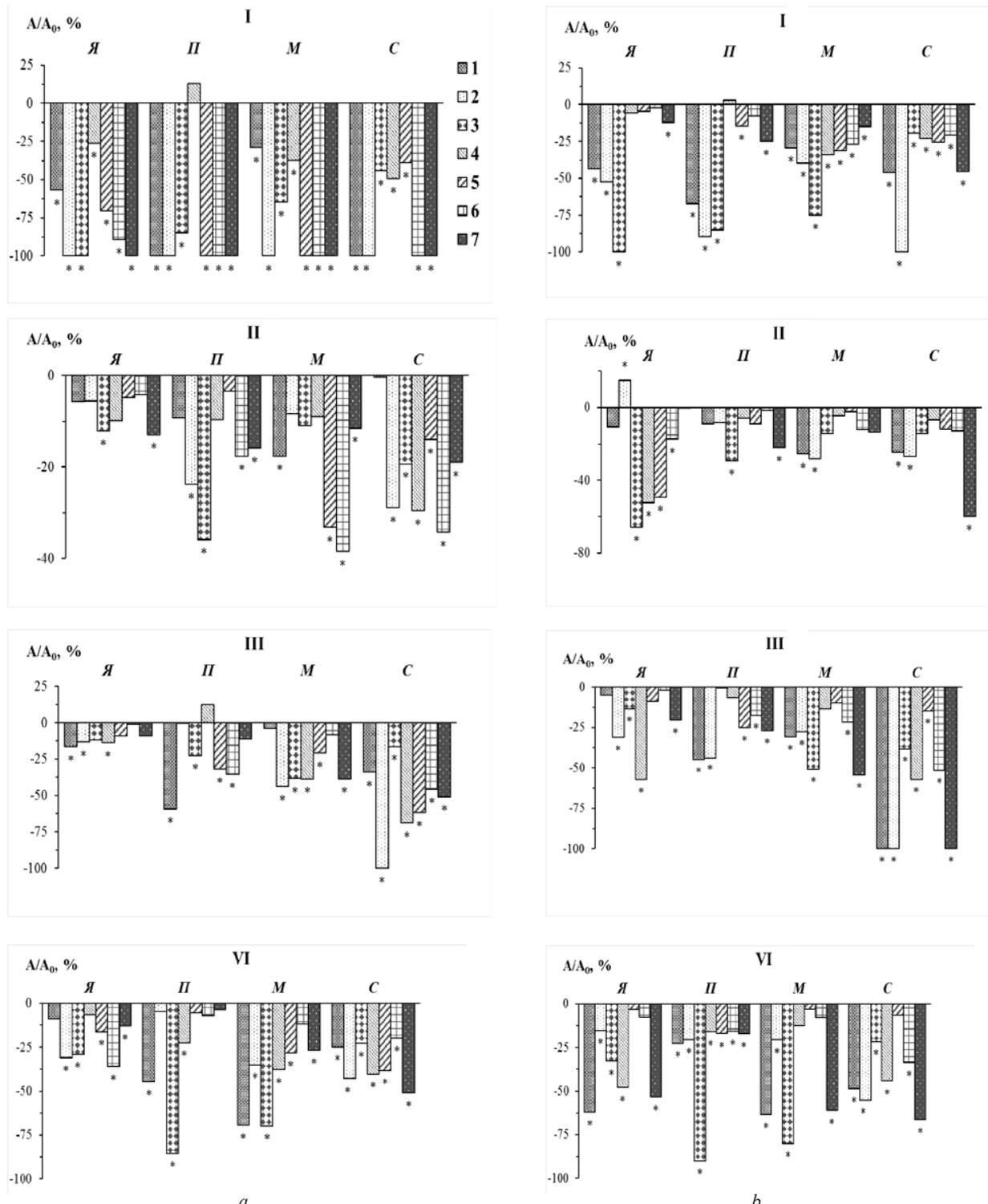
Казеинолитическую активность митохондрий подавляли на 50–55 % лишь *p*-CMB и 8-hQui, тогда как эффект DFP и PMSF не превысил 30 %. Сильнее – на 70 % ингибировал расщепление фибриногена *p*-CMB, но в этом случае сходный эффект вызвал и DFP. Расщепление гемоглобина угнетали полностью все ингибиторы, за исключением DFP, *p*-CMB и ЭДТА.

Казеинолитическую активность супернатанта полностью выключал PMSF, тогда как металл-связывающие эффекторы (кроме ЭДТА) – на 46–69 %. Слабее (на 29–34 %) расщепление желатина подавляли PMSF, ЭДТА и DEDTC. Наиболее заметно расщепление фибриногена подавляли PMSF – на 43 %, а также *o*-phe, ЭДТА и 8-hQui – на 38, 40 и 51 % соответственно. Расщепление же гемоглобина полностью ингибировали DFP, PMSF, DEDTC и 8-hQui. Эффект остальных соединений не превышал 50 %.

На активность щелочных протеиназ (pH 9,0) использованные ингибиторы оказали несколько иной эффект.

Протеолитическую активность ядер ингибиторы подавляли умеренно: на 65,87 %. И только расщепление гемоглобина угнеталось полностью *p*-CMB.

Не превысил 45 % эффект ингибиторов в большинстве случаев на расщепление белков пластидами. Лишь расщепление фибриногена подавлял на 90 % *p*-CMB, а гемоглобинолитическая активность падала на 67 % в присутствии DFP, на 90 и 85 % – в присутствии PMSF и *p*-CMB соответственно.



Действие ингибиторов (% к контролю, принятому за 100 %) на расщепление гемоглобина (I), желатина (II), казеина (III), фибриногена (IV) фракциями клеток *Chlorella vulgaris*: ядерной – Я, пластидной – II, митохондриальной – М, супернатанта – С при pH 7,4 (а) и pH 9,0 (б); ингибиторы: 1 – DFP, 2 – PMSF, 3 – *p*-CMB, 4 – EDTA, 5 – *o*-phe, 6 – DEDTC, 7 – 8-hQui

The action of inhibitors (% to the control taken to 100 %) on the cleaving of hemoglobin (I), gelatin (II), casein (III), fibrinogen (IV) by the cellular particles of *Chlorella vulgaris*: core – Я, plastid – II, mitochondria – М, supernatant – С at pH 7.4 (a) and pH 9.0 (b); inhibitors: 1 – DFP, 2 – PMSF, 3 – *p*-CMB, 4 – EDTA, 5 – *o*-phe, 6 – DEDTC, 7 – 8-hQui

Весьма умеренное, в целом, действие (20–30 %) ингибиторы оказали на расщепление белков протеиназами митохондрий. Однако расщепление казеина угнеталось *p*-СМВ и 8-hQui на 51–54 %, а расщепление фибриногена DFP, *p*-СМВ и 8-hQui на 63, 80 и 61 % соответственно. Гемоглинолитическая активность пластид *p*-СМВ подавлял на 75 %, тогда как эффект остальных ингибиторов не превышал 40 %.

Расщепление казеина супернатантом полностью угнетали DFP, PMSF и 8-hQui, эффект ЭДТА и DEDTC составил 57 и 52 % соответственно. Желатинолитическая активность супернатанта мало чувствительна к действию ингибиторов, лишь 8-hQui на 60 % снижал ее.

Судя по ингибиторному анализу, субклеточные фракции хлореллы наделены достаточно разнообразным набором протеиназ, особенно активных при pH 7,4. Причем, только использование нескольких белков в качестве субстратов позволяет это разнообразие выявить. В этом отношении можно упомянуть результаты прежних исследований, в которых было показано, что эффект биогенных фосфатов, а также неорганических ортофосфата и пирофосфата на активность разнообразных протеиназ зависел от используемого в качестве субстрата белка [15]. Повидимому, подобная особенность проявилась и в данном исследовании.

Примечателен слабо выраженный эффект практически всех группоспецифических ингибиторов на расщепление казеина и желатина при pH 7,4 протеиназами фракции ядер, хотя именно эти белки в данном случае расщеплялись наиболее заметно. Близкая картина выявлена при расщеплении желатина протеиназами пластид и митохондрий, а казеина – протеиназами ядер и пластид при pH 9,0. Это дает основания предположить возможность существования иных протеиназ, кроме известных в настоящее время. Ранее при исследовании протеолитической активности очищенных образцов ингибитора протеиназ белковой природы – овоингибитора была обнаружена фибринолитическая активность при добавлении стрептокиназы. Однако такая система не расщепляла специфический хромогенный субстрат плазмина [14].

В настоящее время мы не располагаем собственными результатами или информацией литературы, проливающей свет на этот вопрос.

В целом же, судя по результатам ингибиторного анализа, наиболее заметно действие цистеиновых и металлов протеиназ (возможно, также SH-протеиназ). При pH 7,4 активность сериновых протеиназ особенно заметно проявлялась при расщеплении гемоглобина протеиназами пластид, супернатанта, в меньшей степени – ядер, а также при расщеплении фибриногена протеиназами митохондрий. И менее заметно активность сериновых протеиназ зарегистрирована при использовании пластид. В щелочной же среде было выражено расщепление гемоглобина сериновыми протеиназами пластид, расщепление казеина – супернатантом, а расщепление фибриногена – таковыми ядер, митохондрий и супернатанта.

**Заключение.** Следовательно, все субклеточные частицы клетки *Chlorella vulgaris* имеют достаточно многоплановый набор протеиназ, способных катализировать расщепление белков при pH 7,4 и 9,0: сериновых, цистеиновых и металлопротеиназ. Выявление этого набора протеолитических энзимов возможно лишь при использовании в качестве субстратов нескольких разных белков. Вместе с тем в отдельных случаях практически весь использованный арсенал группоспецифических ингибиторов протеиназ оказался малоэффективен, несмотря на достаточно демонстративное расщепление белков протеиназами субклеточных частиц. Это позволяет полагать, что существуют протеиназы иного плана, чем перечисленные выше.

#### Список использованных источников

1. Рождественская, Л. Н. Анализ вызовов и современных тенденций развития технологий на рынке белков / Л. Н. Рождественская, Е. С. Бычкова, А. Л. Бычков // Пищевая промышленность. – 2018. – № 5. – С. 42–47.
2. Concentration and characterization of microalgae proteins from *Chlorella pyrenoidosa* / A. G. Waghmare [et al.] // Bioresources and Bioprocessing. – 2016. – Vol. 3, N 16. – P. 1–11. <https://doi.org/10.1186/s40643-016-0094-8>
3. Потенциал применения микроводорослей в качестве сырья для биоэнергетики / К. Н. Сорокина [и др.] // Катализ в промышленности. – 2012. – № 2. – С. 63–72.
4. Никандров, В. Н. Физико-химические особенности реализации протеолитических процессов клетки *Chlorella vulgaris* / В. Н. Никандров, И. А. Ильючик // Актуальные вопросы биологической физики и химии. – 2018. – Т. 3, № 3. – С. 654–664.

5. Ильючик, И. А. Изменения протеолитической активности гомогенатов клеток *Chlorella vulgaris* и функционально-метаболические перестройки культуры при росте в присутствии  $MnCl_2$  / И. А. Ильючик, В. Н. Никандров // Вестн. Полесского гос. ун-та. Сер. природоведения. – 2018. – № 2. – С. 25–33.

6. Ильючик, И. А. Особенности организации системы протеолиза в клетках *Chlorella vulgaris* / И. А. Ильючик, В. Н. Никандров // Тез. докл. Междунар. науч. конф., тринадцатого съезда Белорусского общественного объединения фотобиологов и биофизиков «Молекулярные, мембранные и клеточные основы функционирования биосистем». – Минск, 2018. – С. 112.

7. Финдлей, Дж. Б. Биологические мембраны. Методы / Дж. Б. Финдлей, У. Г. Эванз. – М., 1990. – 424 с.

8. Биохимия растений / пер. с англ. А. А. Бундель; под ред. В. Л. Кретовича. – М., 1968. – 624 с.

9. Метод изучения интенсивности транскрипции индивидуальных митохондриальных генов у растений / Н. С. Белозерова [и др.] // Вестн. РУДН. Сер. агрономия и животноводство. – 2009. – № 1. – С. 65–72.

10. Лемеза, Н. А. Альгология и микология. Практикум / Н. А. Лемеза. – Минск, 2008. – 200 с.

11. Kirschenbaum, D. M. Molar absorptivity and  $A_{1\text{cm}}^{1\%}$  values for proteins at selected wavelengths of the ultraviolet and visible region. XI / D. M. Kirschenbaum // Anal. Biochem. – 1975. – Vol. 68, N 2. – P. 465–484. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(75\)90642-9](https://doi.org/10.1016/0003-2697(75)90642-9)

12. Никандров, В. Н. Методы исследования протеолиза / В. Н. Никандров, Н. С. Пыжова // Современные проблемы биохимии. Методы исследований. – Минск, 2013. – С. 132–157.

13. Никандров, В. Н. Влияние органических растворителей на иницируемый стрептокиназой фибринолиз / В. Н. Никандров, Н. С. Пыжова, В. И. Вотяков // Вопр. мед. химии. – 1987. – Т. 33, № 1. – С. 84–87.

14. Никандров, В. Н. Регуляторные белки: функциональные свойства молекул и механизмы их биологического действия / В. Н. Никандров, Н. С. Пыжова // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. біял. навук. – 2003. – № 3. – С. 75–89.

15. Пыжова, Н. С. Влияние биогенных фосфатов на расщепление белков протеиназами и функцию активаторов плазминогена / Н. С. Пыжова, В. Н. Никандров // Биоорганическая химия. – 2008. – Т. 34, № 3. – С. 382–391.

## References

1. Rozhdestvenskaya L. N., Bychkova E. S., Bychkov A. L. Analysis of challenges and current trends in development technology in the protein market. *Pishcheyaya promyshlennost' = Food processing Industry*, 2018, no. 5, pp. 42–47 (in Russian).

2. Waghmare A. G., Salve M. K., Leblanc J. G., Arya S. S. Concentration and characterization of microalgae proteins from *Chlorella pyrenoidosa*. *Bioresources and Bioprocessing*, 2016, vol. 3, no. 16, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1186/s40643-016-0094-8>

3. Sorokina K. N., Yakovlev V. A., Piligaev V. A., Kukushkin R. G., Pel'tek S. E., Kolchanov N. A., Parmon V. N. Potential of microalgae as a source of bioenergy. *Catalysis in Industry*, 2012, vol. 4, no. 3, pp. 202–208. <https://doi.org/10.1134/s2070050412030117>

4. Nikandrov V. N., Ilyuchik I. A. Physico-chemical features of proteolytic processes realization of *Chlorella vulgaris* cell. *Aktual'nye voprosy biologicheskoi fiziki i khimii* [Topical issues of biological physics and chemistry], 2018, vol. 3, no. 3, pp. 654–664 (in Russian).

5. Ilyuchik I. A., Nikandrov V. N. Proteolytic activity changes of homogenates of *Chlorella vulgaris* cells and culture function-metabolic reorganizations at the growth in the  $MnCl_2$  presence. *Vestnik Poleskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya prirodovedeniya = Bulletin of Polesky State University. Series in natural sciences*, 2018, no. 2, pp. 25–33 (in Russian).

6. Ilyuchik I. A., Nikandrov V. N. Features of the organization of the proteolysis system in *Chlorella vulgaris* cells. *Tezisy докладov Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, trinaditsatogo s'ezda Belorusskogo obshchestvennogo ob'edineniya fotobiologov i biofizikov «Molekulyarnye, membrannye i kletochnye osnovy funktsionirovaniya biosistem»* [Abstracts of the International Scientific Conference, the Thirteenth Congress of the Belarusian Public Association of Photobiologists and Biophysicists “Molecular, membrane and cellular bases of the functioning of biosystems”]. Minsk, 2018, p. 112 (in Russian).

7. Findlay J. B. C., Evans W. H. *Biological membranes. A practical approach*. IRL Press, 1987. 425 p.

8. Bonner A., Varner J. E., eds. *Plant Biochemistry*. New York, 1965. 1072 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-12490-7>

9. Belozerova N. S., Zubo Y. O., Shugaev A. G., Kuznetsov V. V. Method for studying of individual mitochondrial gene transcription in plants. *Vestnik RUDN, seriya Agronomiya i zhivotnovodstvo = RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*, 2009, no. 1, pp. 65–72 (in Russian).

10. Lemeza N. A. *Algology and mycology. Workshop*. Minsk, 2008. 200 p. (in Russian).

11. Kirschenbaum D. M. Molar absorptivity and  $A_{1\text{cm}}^{1\%}$  values for proteins at selected wavelengths of the ultraviolet and visible region. XI. *Analytical Biochemistry*, 1975, vol. 68, no. 2, pp. 465–484. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(75\)90642-9](https://doi.org/10.1016/0003-2697(75)90642-9)

12. Nikandrov V. N., Pyzhova N. S. Methods for the study of proteolysis. *Sovremennye problemy biokhimii. Metody issledovaniy* [Modern problems of biochemistry. Research methods]. Minsk, 2013, pp. 132–157 (in Russian).

13. Nikandrov V. N., Pyzhova N. S., Votyakov V. I. Effect of organic solvents on the streptokinase initiated fibrinolysis. *Voprosy medicinskoj khimii* [Questions of Medical Chemistry], 1987, vol. 33, no. 1, pp. 84–87 (in Russian).

14. Nikandrov V. N., Pyzhova N. S. Regulatory proteins: functional properties of molecules and mechanisms of their biological action. *Vesti Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2003, no. 3, pp. 75–89 (in Russian).

15. Pyzhova N. S., Nikandrov V. N. The effects of biogenic phosphates on proteinase-induced protein cleavage and functioning of plasminogen activator. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 2008, vol. 34, no. 3, pp. 344–352. <https://doi.org/10.1134/s1068162008030163>

**Информация об авторах**

*Ильючик Ирина Анатольевна* – аспирант, старший преподаватель. Полесский государственный университет (ул. Днепровской флотилии, 23, 225710, Пинск, Республика Беларусь). E-mail: irina.iliuchik@mail.ru.

*Никандров Виталий Николаевич* – д-р биол. наук, профессор. Полесский государственный университет (ул. Днепровской флотилии, 23, 225710, Пинск, Республика Беларусь). E-mail: nikandrov.vitaly@gmail.com.

**Information about the authors**

*Ilyuchyk Irina A.* – Postgraduate student, Senior lecturer. Polesky State University (23, Dnieprovskaya Flotiliya Str., 225710, Pinsk, Republic of Belarus). E-mail: irina.iliuchik@mail.ru.

*Nikandrov Vitaliy N.* – D. Sc. (Biology), Professor. Polesky State University (23, Dnieprovskaya Flotiliya Str., 225710, Pinsk, Republic of Belarus). E-mail: nikandrov.vitaly@gmail.com.

О. Г. Бабак<sup>1</sup>, С. И. Игнатова<sup>2</sup>, Н. А. Голубкина<sup>3</sup>, Н. А. Некрашевич<sup>1</sup>, Н. В. Анисимова<sup>1</sup>,  
Т. В. Никитинская<sup>1</sup>, К. К. Яцевич<sup>1</sup>, академик А. В. Кильчевский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Федеральный научный центр овощеводства, Верей, Российская Федерация

<sup>3</sup>Федеральный научный центр овощеводства, ВНИИССОК, Российская Федерация

## АНАЛИЗ ПОЛИМОРФИЗМА ГЕНА *SLMYB12*, ДЕТЕРМИНИРУЮЩЕГО БИОСИНТЕЗ ХАЛКОН-НАРИНГЕНИНА В КОЖИЦЕ ПЛОДОВ ТОМАТА, И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА НАКОПЛЕНИЕ ЛИКОПИНА

**Аннотация.** Оценена эффективность выявления форм томата с отсутствием флавоноида халкон-нарингенина в розовоплодных и желтоплодных формах с помощью ДНК-маркеров к различным полиморфизмам гена *SLMYB12*. Показана наиболее тесная связь между фенотипом с прозрачной кожицей плодов и делецией в промоторной области гена *SLMYB12*. Установлена наибольшая эффективность выявления рецессивного аллеля у регуляторного гена *SLMYB12*, приводящего к нарушению синтеза халкон-нарингенина и прозрачности кожицы, сочетанием маркеров MYB12-603del-aF1/603del-aR6 (Myb-603del aF1/R6) и MYB12-603del-aF1/603del-aR5 (Myb12 aF1/R5). Показаны особенности окраски плодов в зависимости от комбинации структурных аллелей пути биосинтеза каротиноидов и аллелей гена *SLMYB12*. Сочетание данного аллеля у с аллелями гена ликопин-β-циклазы *beta* (*b*) и *old gold crimson* (*og<sup>c</sup>*) позволяет отобрать розовые и малиновые формы соответственно. У образцов томата с желтой и оранжевой окраской плодов аллель у обеспечивает бледные оттенки основных окрасок, обусловленных генами биосинтеза каротиноидов (*yellow flesh* (*r*), *tangerine* (*t*), *Beta* (*B*)). Выявлено наличие SNP T → C гена *SLMYB12* (позиция 71476848 хромосомы 1) у 80 % образцов с прозрачной кожицей плодов оцениваемой коллекции. Показано влияние рецессивного аллеля у гена *SLMYB12* на увеличение концентрации ликопина в плодах томата в комбинации с аллелями *b*, *og<sup>c</sup>*. С использованием методов MAC по генам качества плодов, в том числе по гену *SLMYB12*, создан и включен в Государственный реестр сорт томата черри Малиновый коктейль с высоким накоплением ликопина.

**Ключевые слова:** томат, генетические маркеры, каротиноиды, халкон-нарингенин

**Для цитирования.** Анализ полиморфизма гена *SLMYB12*, детерминирующего биосинтез халкон-нарингенина в кожице плодов томата, и его влияния на накопление ликопина / О. Г. Бабак [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 702–712. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-702-712>

Olga G. Babak<sup>1</sup>, Svetlana I. Ignatova<sup>2</sup>, Nadezhda A. Golubkina<sup>3</sup>, Nataliya A. Nekrashevich<sup>1</sup>, Nataliya A. Anisimova<sup>1</sup>,  
Tatiana V. Nikitinskaya<sup>1</sup>, Konstanciya K. Yatsevich<sup>1</sup>, Academician Alexander V. Kilchevsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Federal Scientific Centre for Vegetable Growing, Vereya, Russian Federation

<sup>3</sup>Federal Scientific Centre for Vegetable Growing, VNIISOK, Russian Federation

## ANALYSIS OF *SLMYB12* GENE POLYMORPHISM DETERMINING CHALCONE-NARINGENIN BIOSYNTHESIS IN THE SKIN OF TOMATO FRUITS AND ITS EFFECT ON THE LYCOPENE ACCUMULATION

**Abstract.** Efficiency in detecting of tomato forms with no chalcone-naringenin flavonoid in pink-fruited and yellow-fruited forms was evaluated using DNA markers for various polymorphisms of the *SLMYB12* gene. The closest relationship between a phenotype with the transparent skin of fruits and a deletion in the promoter region of the *SLMYB12* gene was shown. The highest efficiency in the detection of the recessive *y* allele of the regulatory *SLMYB12* gene, leading to the chalcone-naringenin synthesis disruption and skin transparency, was established by a combination of markers MYB12-603del-aF1/603del-aR6 (Myb-603del aF1/R6) and MYB12-603del-aF1/603del-aR5 (Myb12 aF1/R5). Fruit coloration peculiarities were shown depending on a combination of the structural alleles of a carotenoid biosynthesis pathway and *SLMYB12* gene alleles. A combination of this *y* allele with the alleles of the gene of the lycopene-β-cyclase *beta* (*b*) and *old gold crimson* (*og<sup>c</sup>*) allows selecting pink and raspberry forms respectively. In tomato accessions with yellow and orange fruits, the *y* allele provides pale shades of the main coloration determined by carotenoid biosynthesis genes (*yellow flesh* (*r*), *tangerine* (*t*), *Beta* (*B*)). The presence of SNP T → C of the *SLMYB12* gene (171476848 position of chromosome 1) was identified in 80 % of accessions with the transparent skin of fruits of the evaluated collection. The effect of the recessive *y* allele of the *SLMYB12* gene on an increase in the lycopene concentration of tomato fruits in a combination with *b*, *og<sup>c</sup>* alleles was shown. Using MAC methods

by fruit quality genes, including the *SIMYB12* gene, the cherry tomato variety Malinovyj koktel with a high lycopene accumulation was developed and included in the State Register.

**Keywords:** tomato, genetic markers, carotenoids, chalcone-naringenin

**For citation:** Babak O. G., Ignatova S. I., Golubkina N. A., Nekrashevich N. A., Anisimova N. A., Nikitinskaya T. V., Yatshevich K. K., Kilchevsky A. V. Analysis of *SIMYB12* gene polymorphism determining chalcone-naringenin biosynthesis in the skin of tomato fruits and its effect on the lycopene accumulation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 702–712 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-702-712>

**Введение.** Использование методов молекулярного маркирования является одним из важнейших инструментов в селекции томата на качество плодов. Работы по ДНК-типированию хозяйственно ценных признаков весьма эффективно ведутся в мировых научных центрах как на этапе подбора исходных источников для гибридизации, так и при последующем анализе гибридного материала и созданных форм. В выполненных ранее исследованиях нами разработаны методические основы ДНК-маркирования генов длительной сохранности плодов (*nor*, *nor<sup>d</sup>*, *rin*) и каротиноидов (*r*, *t*, *og*, *og<sup>c</sup>*, *B*, *gf-3*, *hp-1*, *hp-2<sup>ds</sup>*) у томата, отобраны образцы с интересующими аллелями. В ходе выполнения ступенчатой гибридизации и отборов созданы формы с сочетаниями структурных и регуляторных аллелей, обеспечивающих различную окраску плодов и высокое накопление каротиноидов [1–3]. Наряду с данными исследованиями представляет интерес изучение особенностей проявления окраски плодов и накопления пигментов в зависимости от аллелей, детерминирующих синтез определенных флавоноидов. Одним из важных для томата флавоноидов, влияющих на качество плодов, является халкон-нарингенин (далее халкон). Накапливаясь в клетках эпидермиса плодов, он выполняет, прежде всего, защитные функции. Регуляция синтеза халкона связана с полиморфизмом гена транскрипционного фактора *SIMYB12*, расположенного на хромосоме 1 [4]. Лocus гена *SIMYB12* имеет доминантный и рецессивный аллели. Наличие доминантного аллеля *Y* обеспечивает накопление халкона и желтый цвет кожицы. Для рецессивного аллеля *y* характерна делеция размером 603 п. н. в промоторной области, приводящая к нарушению синтеза халкона в кожице плодов и ее прозрачности [5]. Наряду с вышеуказанной делецией, K. Veerappan, H. J. Jung и соавт. связывают отсутствие халкона в кожице плодов с выявленной однонуклеотидной вставкой и четырьмя нуклеотидными заменами [6; 7]. При этом В. Kim и соавт. при изучении полиморфизма данного гена связывают нарушение синтеза халкона с присутствием семи однонуклеотидных замен в экзонах, не находя отличий в промоторной области гена [8].

В литературе полиморфизм гена *SIMYB12* изучается в связи с возможностью выявлять формы томата с розовой окраской плодов. Данная окраска проявляется у форм с преимущественным накоплением ликопина и прозрачной кожицей плодов. При этом литературных данных о полиморфизме гена *SIMYB12* у желтоплодных форм нет.

Исходя из вышеуказанного, целью данных исследований было дальнейшее изучение генетических механизмов накопления пигментов в плодах томата в зависимости от комбинации аллелей структурных генов биосинтеза каротиноидов и гена *SIMYB12*, регулирующего синтез халкон-нарингенина, а также совершенствование методов ДНК-типирования аллелей качества плодов. Для достижения указанных целей были поставлены следующие задачи: оценка методов ДНК-типирования известных полиморфизмов гена *SIMYB12*; ДНК-типирование широкой коллекции форм томата на наличие данных полиморфизмов; изучение особенностей проявления окраски плодов и накопления каротиноидов у форм томата в зависимости от сочетания аллелей структурного гена ликопин-β-циклазы (*CYCB*) и транскрипционного фактора *SIMYB12*; выделение селекционных образцов с максимальным накоплением каротиноидов.

**Материалы и методы исследования.** Материалом для оценки полиморфизма служили коллекции форм томата Института генетики и цитологии и селекционно-семеноводческой агрофирмы (ССАФ) «Ильинична» – ВНИИО филиал Федерального научного центра овощеводства (ФГБНУ ФНЦО, Россия).

Для оценки эффективности методов ДНК-типирования аллелей гена *SIMYB12* использованы коллекции красноплодных (от розовых до темно-красных) и желтоплодных (от светло-желтых до оранжевых) форм с различными сочетаниями аллелей структурных и регуляторных генов.

Для оценки влияния аллелей гена *SIMYB12* на накопление каротиноидов были отобраны образцы томата с тремя аллелями структурного гена *CYCB* и регуляторных генов, обеспечивающих различное накопление каротиноидов. Отобранные генотипы включали следующие аллели гена хромoplast-специфической ликопин  $\beta$ -циклазы (*CYCB*): *beta* (*b* из *S. Lycopersicum*), *Beta carotene* (*B* из *S. pennellii*), *old-gold crimson* (*og<sup>c</sup>* – мутация в *beta*). Наличие аллеля *b* определяет синтез преимущественно ликопина и в меньшей степени  $\beta$ -каротина. Аллель *B* способствует повышенному накоплению  $\beta$ -каротина, а мутация *og<sup>c</sup>* приводит к повышенному синтезу ликопина [9]. В комбинацию регуляторных генов входили: аллель *ripening inhibitor* (*rin*) транскрипционного фактора LeMADS-Rin, замедляющий синтез каротиноидов [10], аллель *high pigment 2 dark green* (*hp-2<sup>dg</sup>*) гена *HP-2*, регулирующий работу фоторецепторов и контролирующий размер клеток и число хлоропластов [11], и аллель *green flesh-3* (*gf-3*) регуляторного фактора Stay-green, кодирующий способность не разрушать хлорофилл в начале созревания плодов [12]. Наряду с вышеуказанными комбинациями, использованы формы с *b* и *og<sup>c</sup>* аллелями в сочетании с *Y* и *y* аллелями гена *SIMYB12* (*Y* и *y*), регулирующего накопление флавоноида халкона в кожуре плодов томата [5].

Этапы молекулярного анализа (выделение ДНК, амплификация и анализ продуктов амплификации) выполнены с использованием методических рекомендаций «ДНК-типирование генов качества плодов и устойчивости к болезням томата» [2].

Для изучения роста и развития форм томата с различной комбинацией генов качества проведены испытания изучаемых форм в условиях остекленных теплиц опытной станции Института генетики и цитологии НАН Беларуси.

Анализ каротиноидного состава изучаемых образцов проводился в лабораторно-аналитическом отделе ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства» методом тонкослойной хроматографии на хроматографической бумаге Ватман А3 в системе гексан-ацетон 10 : 0,5. Концентрацию индивидуальных каротиноидов после элюирования с бумаги определяли спектрофотометрически по величине поглощения при 451 нм (бета-каротин), 470 нм (ликопин) и 445 нм (лютеин), используя в качестве стандартов образцы указанных каротиноидов (Sigma) [13].

**Результаты и их обсуждение.** Оценка эффективности методов ДНК-типирования аллелей гена *SIMYB12*. На первом этапе работы выполнена оценка эффективности выявления розово-плодных форм с помощью известных в литературе маркеров к следующим полиморфизмам гена *SIMYB12*, связанным с нарушением синтеза халкона: делеции размером 603 п. н. в промоторной области, описываемой K. Veegarran и соавт. [6; 7] и группы SNP, выявленной В. Kim и соавт. [8].

Для идентификации делеции размером 603 п. н. в гене фактора транскрипции *SIMYB12* разработчиками [6] предложены SCAR маркеры MYB12-603del-aF1/R6 и MYB12-603del-aF1/R5 (603del-aF1 – gtagcgaacaaccgaacctaagaataa; 603del-aR5 – gcggacaaagttaattggtcactca; 603del-aR6 – attctagcgttatcagtcggcatacad). В результате применения пары праймеров 603del-aF1/aR5 амплифицируется один продукт размером 614 п. н. у форм с отсутствием делеции, а пары праймеров 603del-aF1/aR6 – амплифицируются 2 продукта размером 347 и 950 п. н., характеризующих наличие или отсутствие делеции. Согласно авторам, у образцов с геном *SIMYB12*, обеспечивающим нормальный синтез халкона, синтезируются два продукта размером 950 и 614 п. н., а у растений с делетированным геном *SIMYB12* (розовые плоды) синтезируется только один продукт размером 347 п. н. У растений, гетерозиготных по данному гену, синтезируются все три продукта. С помощью данных праймеров выполнено ДНК-типирование гена *SIMYB12* на широкой коллекции форм с розовой и красной окраской плодов. На рис. 1 представлены результаты апробации предложенных маркеров с объединением продуктов ПЦР в одном фореze.

Согласно полученным данным и их сопоставлению с фенотипическим проявлением окраски плодов, у всех образцов используемой нами коллекции розовоплодных форм идентифицирована делеция ожидаемого размера (347 п. н.). У форм с ненарушенным синтезом халкона (красноплодные формы № 11, 12 – F<sub>1</sub> Медина, № 23, 24 – Индиго, № 25, 26 – LA 1996) на электрофореграмме наблюдались две полосы ожидаемых фрагментов 614 и 950 п. н. При этом у гетерозиготных форм (№ 13, 14 – F<sub>1</sub> Pink bush и № 27, 28 – F<sub>2</sub> из Виктория) четко идентифицируются только два фрагмента – 347 и 614 п. н., в отличие от описываемых авторами трех фрагментов. Следует отме-

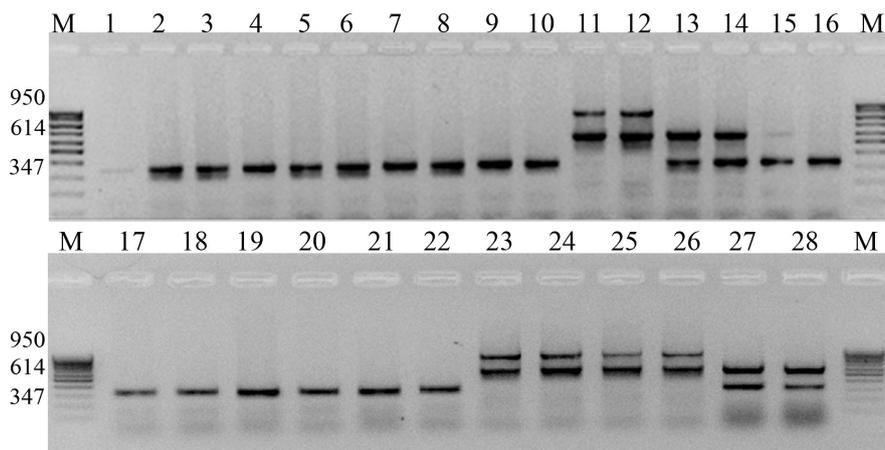


Рис. 1. Результаты амплификации ДНК коллекции розовоплодных форм томата с праймерами к маркерам MYB12-603del-aF1/aR5 и MYB12-603del-aF1/R6: 1, 2 – Малиновые пикули (№ 6322ВИР); 3, 4 – Лотос (ВНИИССОК); 5, 6 – Хабаровский розовый; 7, 8 – Розовое сердце; 9, 10 – Крымское яблоко; 11, 12 – F<sub>1</sub> Медина; 13, 14 – F<sub>1</sub> Pink bush; 15, 16 – Темно-розовый; 17, 18 – Крупный розовый; 19, 20 – Малиновый штамбовый; 21, 22 – Pink paradise; 23, 24 – Индиго; 25, 26 – LA 1996 (*Aft*, *Y*); 27, 28 – F<sub>2</sub> из Виктория

Fig. 1. DNA amplification results of the pink-fruited tomato collection with primers to the markers MYB12-603del-aF1/aR5 and MYB12-603del-aF1/R6: 1, 2 – Malinovyе pikuli (No. 6322VIR); 3, 4 – Lotos (VNISSOK); 5, 6 – Habarovskiy rozovyy; 7, 8 – Rozovoe serdtse; 9, 10 – Krymskoye yabloko; 11, 12 – F<sub>1</sub> Medina; 13, 14 – F<sub>1</sub> Pink bush; 15, 16 – Temno-rozovyy; 17, 18 – Krupnyy rozovyy; 19, 20 – Malinovy shtambovy; 21, 22 – Pink paradise; 23, 24 – Indigo; 25, 26 – LA 1996 (*Aft*, *Y*); 27, 28 – F<sub>2</sub> from Viktoria

тить, что на рисунках авторов фрагмент размером 950 п. н. проявляется значительно слабее, чем 614 и 347. Учитывая, что все 3 фрагмента имеют общую область синтеза (рис. 2, *a*), фрагмент меньшего веса синтезируется быстрее, и, как следствие, его проявление на электрофореграмме более яркое (рис. 2, *b*).

Наряду с розовоплодными и красноплодными формами нами проведена апробация маркеров Myb-603del aF1/R6 и Myb12 aF1/R5 на формах с различными оттенками желтой и оранжевой окраски плодов. Необходимо отметить, что различные оттенки желтоокрашенных плодов определяются рядом структурных (*r*, *t*, *del*, *B*) аллелей пути биосинтеза каротиноидов и регуляторных аллелей (*nor*, *rin* и др.), поэтому без отделения эпидермиса зрительно сложно выделить плоды с отсутствием халкона в кожице. На рис. 3 показано разделение продуктов амплификации ряда образцов с различными структурными и регуляторными аллелями с каждым маркером отдельно. Как и на рис. 1, при использовании пары праймеров aF1/aR6 (рис. 3, *a*) у образцов с наличием делеции продукт размером 950 п. н. не образуется в достаточном для проявления на форе

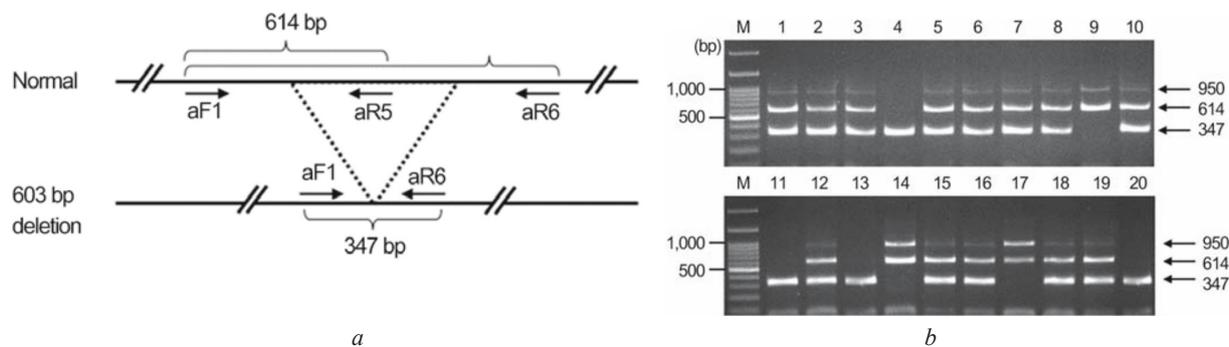


Рис. 2. Позиции праймеров и размера продуктов амплификации для идентификации делеции размером 603 п. н. (*a*); гель-электрофорез продуктов амплификации с праймерами aF1/aR5 и aF1/R6 (*b*) [6]

Fig. 2. Primer positions and the size of amplification products to identify a 603 bp deletion (*a*); Gel electrophoresis of amplification products with the primers aF1/aR5 and aF1/R6 (*b*) [6]

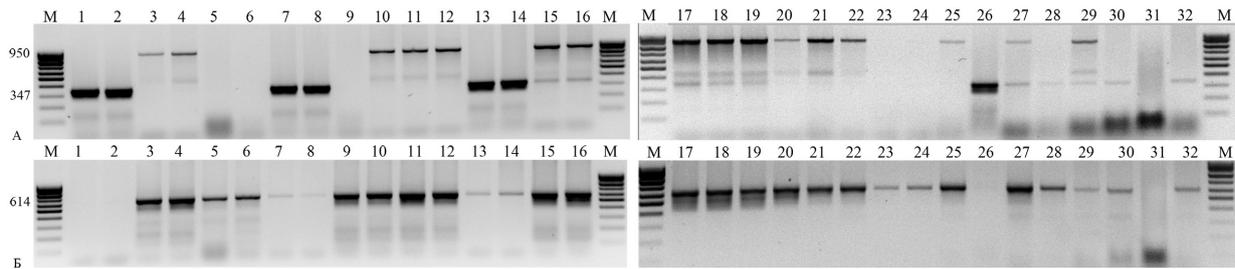


Рис. 3. Результаты амплификации ДНК желтоплодных форм томата с праймерами к маркерам Myb-603del aF1/R6 и Myb12 aF1/R5: 1, 2 – Большой пломбир; 3, 4 – Луч; 5, 6 – Золотой; 7, 8 – Дачные; 9, 10 – LTN<sub>A</sub>; 11, 12 – LTN<sub>M</sub>; 13, 14 – LA3381 (y); 15, 16 – LA3811; 17, 18 – LA3375; 19, 20 – LBPN<sub>D</sub>; 21, 22 – LBPR<sub>D</sub>; 23, 24 – LBGND<sub>D</sub>; 25 – Mini gold; 26 – Желтые пальчики; 27, 28 – ЖЧ 1; 29, 30 – ЖЧ 2; 31, 32 – ОЧ

Fig. 3. DNA amplification results of the yellow fruit tomato collection with primers to the Myb-603del aF1/R6 and Myb12 aF1/R5 markers: 1, 2 – Bolshoi plombir; 3, 4 – Luch; 5, 6 – Zolotoi; 7, 8 – Dachnye; 9, 10 – LTN<sub>A</sub>; 11, 12 – LTN<sub>M</sub>; 13, 14 – LA3381 (y); 15, 16 – LA3811; 17, 18 – LA3375; 19, 20 – LBPN<sub>D</sub>; 21, 22 – LBPR<sub>D</sub>; 23, 24 – LBGND<sub>D</sub>; 25 – Mini gold; 26 – Zholytye palchiki; 27, 28 – ZhCh1; 29, 30 – ZhCh2; 31, 32 – OCh

количестве. Наряду с образцом LA3381 с рецессивным аллелем y, который является контрольным (из коллекции калифорнийского банка генетических ресурсов томата), полученные результаты позволили выявить наличие данного аллеля у образцов Большой пломбир, Дачные, Желтые пальчики.

Сравнение полученных данных ДНК-типирования с фенотипом подтвердило наличие искомой делеции у форм с отсутствием халкона в коже плодов. Как и у красноплодных форм, желтоплодные формы с выявленной делецией имели прозрачную кожу (рис. 4).

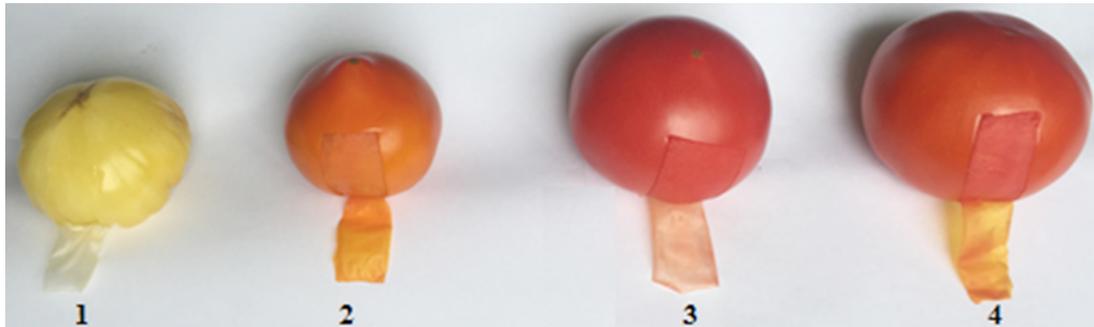


Рис. 4. Окраска кожи плодов у форм с различными аллелями гена *SIMYB12*: 1 – Большой пломбир (r, b, y); 2 – LBPN<sub>D</sub> (B, hp2<sup>del</sup>, Y); 3 – Галактика (b, y); 4 – Бумеранг (b, Y)

Fig. 4. Fruit skin coloration in forms with different alleles of the *SIMYB12* gene: 1 – Bolshoi plombir (r, b, y); 2 – LBPN<sub>D</sub> (B, hp2<sup>del</sup>, Y); 3 – Galaktika (b, y); 4 – Bumerang (b, Y)

Для идентификации однонуклеотидной замены Т → С (позиция 71476848 хромосомы 1), предлагаемой В. Kim и соавт. как наиболее эффективной для отбора розовоплодных форм, использован CAPS-38123F/R\_ *MnI* маркер (F – TCCTGTAGTGCAGCACTACCACCT; R – CCAATCTTGGTGGACAGAGTT) [8]. Для выявления ожидаемой SNP должен синтезироваться продукт размером 178 п. н. После применения фермента *MnI* у растений с красными плодами продукт остается неизменным, а у растений с розовыми плодами образуются продукты размером 124 и 54 п. н. (рис. 5).

ДНК-типирование образцов томата с маркером 38123F/R\_ *MnI* выявило четыре формы (Крымское яблоко, Pink bush, Индиго и LA3381 (Y)) с наличием доминантного аллеля Y гена *SIMYB12* (желтая окраска эпидермиса). Образцы Индиго и LA3381 являются красноплодными. Плоды форм Крымское яблоко, Pink bush при этом имеют розовую окраску. По результатам ДНК-типирования делеции в промоторной области гена *SIMYB12*, образец Pink bush является гетерозиготным по данному аллелю, что объясняет наличие неразрезанной части продукта, наряду

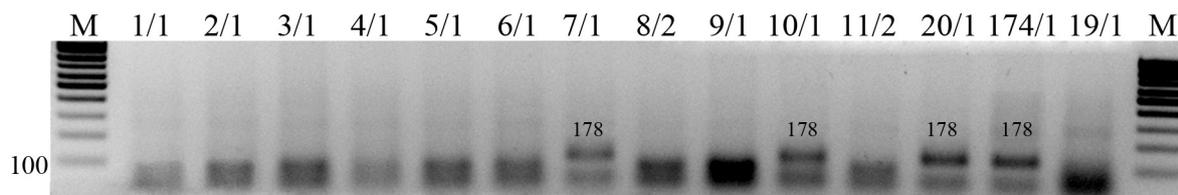


Рис. 5. Результаты амплификации ДНК розовоплодных форм томата с праймерами 38123F/38123R и последующей рестрикцией ферментом *MnlI*: 1/1 – Крупный розовый; 2/1 – Малиновые пикули (№ 6322ВИР); 3/1 – Малиновый штамбовый; 4/1 – Лотос (ВНИИССОК); 5/1 – Хабаровский розовый; 6/1 – Розовое сердце; 7/1 – Крымское яблоко; 8/2 – Медина (F<sub>1</sub>); 9/1 – Pink paradise; 10/1 – Punk bush; 11/2 – Темно-розовый; 20/1 – Индиго; 174/1 – LA (Aft); 19/1 – F<sub>2</sub> Виктория

Fig. 5. DNA amplification results of pink-fruited tomato forms with primers to the 38123F/38123R marker and the subsequent restriction with the *MnlI* enzyme: 1/1 – Krupnyi rozovyi; 2/1 – Malinovyie pikuli (No. 6322VIR); 3/1 – Malinovyi shtambovyi; 4/1 – Lotos (VNISSOK); 5/1 – Khabarovskiy rozovyi; 6/1 – Rozovoe serdtse; 7/1 – Krymskoe yabloko; 8/2 – F<sub>1</sub> Medina; 9/1 – Pink paradise; 10/1 – Pink bush; 11/2 – Temno-rozovyi; 20/1 – Indigo; 174/1 – LA (Aft); 19/1 – F<sub>2</sub> Viktoria

с разрезанной. Остальные розовоплодные формы (10 из 12) имели продукты, полностью разрезанные ферментом *MnlI*. Таким образом, при ДНК-типировании делеции в промоторной области и SNP в экзонной области на нашей коллекции розовоплодных форм наблюдались различия у одного образца – Крымское яблоко, у которого основная окраска плода розовая (с полосами желто-зеленого цвета, обусловленными наличием гена *gs*), но с помощью маркера 38123F/R\_ *MnlI* она не выявлялась. Образец Медина, имеющий красно-розовую окраску, характеризовался отсутствием делеции, но при этом у него наблюдалась нуклеотидная замена, характерная, согласно В. Kim, для форм с прозрачной кожицей.

Наряду с красно- и розовоплодными формами, был проанализирован полиморфизм желтоплодных форм по изучаемой однонуклеотидной замене. В качестве контроля использовали формы LA 3381и LA 3811, а также по 2 розовоплодные и красноплодные формы (рис. 6).

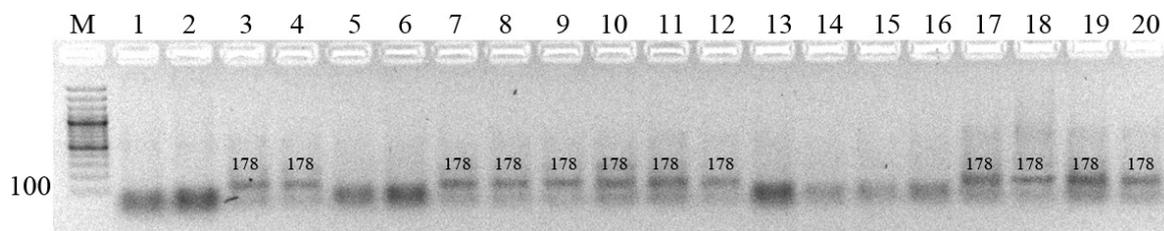


Рис. 6. Результаты амплификации ДНК форм томата с различной окраской плодов с праймерами к маркеру 38123F/38123R и последующей рестрикцией ферментом *MnlI*: 1, 2 – Большой пломбир; 3, 4 – Дачные; 5, 6 – Желтые пальчики; 7, 8 – LA 3381 (y); 9, 10 – LBPR<sub>д</sub>; 11, 12 – LA 3811 (Y); 13, 14 – Малиновый коктейль; 15, 16 – Л 289-15; 17, 18 – Л 160-15; 19, 20 – Г 960

Fig. 6. DNA amplification results of tomato forms with different fruit coloration with primers to the 38123F/38123R marker and the subsequent restriction with the *MnlI* enzyme: 1, 2 – Bolshoi plombir; 3, 4 – Dachnye; 5, 6 – Zholtые palchiki; 7, 8 – LA 3381 (y); 9, 10 – LBPR<sub>д</sub>; 11, 12 – LA 3811 (Y); 13, 14 – Malinovyi kokteil; 15, 16 – L 289-15; 17, 18 – L 160-15; 19, 20 – G 960

Сопоставление результатов ДНК-типирования с помощью маркеров, предлагаемых различными авторами, представлено в табл. 1. Согласно представленным данным из 16 форм с делецией в промоторной области 13 форм подтвердили возможность типирования образцов без накопления халкона в кожице плодов с помощью оцениваемого CAPS маркера. При этом у одной розовоплодной и двух желтоплодных форм с прозрачной кожицей возможность оценки с помощью CAPS маркера 38123F/R\_ *MnlI* не подтвердилась.

Кроме того, учитывая, что при использовании CAPS маркера 38123F/R\_ *MnlI* продукты рестрикции имеют небольшие размеры, и часто после рестрикции в нижней части электрофореграмм остаются случайные мелкие фрагменты, является сложным выделение гетерозиготных образцов с использованием данного маркера.

Т а б л и ц а 1. Результаты ДНК-типирования маркеров розовоплодности на коллекции форм томата

T a b l e 1. DNA typing results of pink fruit markers for the collection of tomato forms

Наименование образца Sample name	MYB12-603del (делеция 603 п. н.)	38123F/R_ Mnl1 (SNP T→C)	Окраска плода Fruit color
Крупный розовый	+	+	Розовая
Малиновые пикули	+	+	Розовая
Малиновый штамбовый	+	+	Розовая
Лотос	+	+	Розовая
Хабаровский розовый	+	+	Розовая
Розовое сердце	+	+	Розовая
Крымское яблоко	+	–	Розовая
Медина	–	+	Красно-розовая
Pink paradise	+	+	Розовая
Pink bush	+/-	–	Ярко-розовая
Темно-розовый	+/-	+	Темно-розовая
Индиго ( <i>Ant</i> , <i>Y</i> )	–	–	Красно-фиолетовая
LA 1996 ( <i>Aft</i> , <i>Y</i> )	–	–	Красная
Виктория	+/-	+	Розовая
Л 289-15	+	+	Розовая
Л 160-15	–	–	Красная
Г 960	–	–	Красная
Малиновый коктейль	+	+	Розовая
LA3811( <i>Y</i> , <i>gf</i> , <i>r</i> )	–	–	Желтая
LBP <sub>N</sub> <sub>д</sub>	–	–	Ярко-желтая
LA3381( <i>y</i> , <i>r</i> )	+	–	Бледно-желтая
Желтые пальчики	+	+	Желтая
Дачный	+	–	Желтая
Большой пломбир	+	+	Бледно-желтая

П р и м е ч а н и е: «+» и «–» – наличие/отсутствие полиморфизма, связанного с нарушением синтеза халкона в кожице плодов, «+/-» – гетерозиготный аллель гена *SIMYB12* по изучаемому полиморфизму.

N o t e: “+” and “–” – presence/absence of polymorphism associated with impaired synthesis of chalcone in the skin of fruits, “+/-” – heterozygous allele of the *SIMYB12* gene for the studied polymorphism.

Таким образом, в результате апробации и оценки эффективности предлагаемых в литературе ДНК-маркеров нарушения синтеза халкона в кожице плодов томата на образцах используемой нами коллекции установлена наибольшая эффективность выявления рецессивного аллеля у регуляторного гена *SIMYB12* сочетанием маркеров MYB12-603del-aF1/603del-aR6 (Myb-603del aF1/R6) и MYB12-603del-aF1/603del-aR5 (Myb12 aF1/R5). В результате исследований подобраны условия для ПЦР-амплификации и разработан протокол ДНК-типирования делеции в промоторной области гена *SIMYB12*, являющейся эффективным маркером отсутствия флавоноида халкон-нарингенина в плодах томата. Данные праймеры использованы для создания путем гибридизации и маркер сопутствующего отбора из популяционного материала F<sub>2</sub> форм с различными комбинациями структурных генов пути биосинтеза каротиноидов и регуляторных генов, влияющих на накопление каротиноидов и флавоноидов.

*Изучение особенностей накопления каротиноидов.* Следующим этапом выполняемой работы было изучение особенностей накопления каротиноидов у форм томата в зависимости от сочетания аллелей структурного гена ликопин-β-циклазы (*CYCB*) и транскрипционного фактора *SIMYB12*. В ранее выполненных исследованиях были созданы образцы с различными сочетаниями структурных и регуляторных генов качества плодов, проанализировано содержание кароти-

ноидов и выявлены закономерности их накопления в зависимости от комбинации аллелей [3; 14]. В табл. 2 показаны результаты оценки каротиноидного состава плодов у созданных линий со структурными аллелями гена *CYCB*  $og^c$ ,  $b$ ,  $B$  и комплексом регуляторных аллелей: *rin* (уменьшение накопления каротиноидов), *gf-3* (замедленное разрушение хлорофилла), *hp2<sup>dg</sup>* (увеличение накопления каротиноидов). Все используемые нами образцы имели доминантный аллель  $Y$  гена *SIMYB12* с нормальным синтезом флавоноида халкон-нарингенина в кожице плодов. В табл. 2 также представлены сорта и гибриды, линейный материал селекции ССАФ «Ильнична» – ФГБНУ ФНЦО, а также образец томата-черри Института генетики и цитологии НАН Беларуси – Малиновый коктейль с аналогичными аллелями гена *CYCB* ( $og^c$ ,  $b$ ), но отличающийся наличием рецессивного аллеля  $y$  гена *SIMYB12*, блокирующего синтез халкона в плодах. Представленные данные позволяют оценить влияние аллелей  $Y$  и  $y$ , напрямую не связанных с синтезом каротиноидов, а также сравнить его с влиянием ранее изученных аллелей. В табл. 2 представлены результаты анализа каротиноидного состава, сделанного методом тонкослойной хроматографии.

Т а б л и ц а 2. Содержание каротиноидов в плодах образцов томата с различным сочетанием аллелей качества (мг/100 г массы), 2017 г.

Table 2. Carotenoid content in tomato fruit samples with a different combination of fruit quality alleles (mg/100 g wet basis), 2017

Название образца Sample name	Генотип Genotype	Бета-каротин Beta-carotene	Ликопин Lycopene	Лютеин Lutein	Хлоро- филл Chlorophyll
<i>Красноплодные формы</i>					
LON <sub>д</sub>	$og^c/og^c//Y/Y$	1,9	11,5	2,7	0
LOPN <sub>д</sub>	$og^c/og^c//hp2^{dg}/hp2^{dg}//Y/Y$	1,7	15,4	2,6	0
LOG	$og^c/og^c//gf3/gf3//Y/Y$	2,0	11,4	2,2	0
LOPR <sub>м</sub>	$og^c/og^c//hp2^{dg}/hp2^{dg}/rin/rin//Y/Y$	0	0	0	2,1
Старт	$b/b//Y/Y$	1,9	4,8	0	0
ЛьР	$b/b//hp2^{dg}/hp2^{dg}//Y/Y$	2,8	12,4	2,7	0
Черная груша	$b/b//gf-3/gf-3//y/y$	1,5	9,2	2,6	0
ЛьРГ	$b/b//hp2^{dg}/hp2^{dg}/gf3/gf3//Y/Y$	2,0	6,3	1,8	9,9
Луч	$B/B//Y/Y$	5,4	0,9	2,0	–
LBPN <sub>д</sub>	$B/B//hp2^{dg}/hp2^{dg}//Y/Y$	6,7	0	4,0	0
LBPR <sub>д</sub>	$B/B//hp2^{dg}/hp2^{dg}//Y/Y$	11,0	2,9	3,0	–
LBPR <sub>м</sub>	$B/B//hp2^{dg}/hp2^{dg}/rin/rin//Y/Y$	1,0	–	1,1	–
ЛВGR <sub>м</sub>	$B/B//gf-3/gf-3/rin/rin//Y/Y$	0	0	0	0,58
ЛВGR <sub>д</sub>	$B/B//gf-3/gf-3//Y/Y$	2,0	–	3,5	0
<i>Розовоплодные формы</i>					
Малиновый коктейль	$b/b//y/y$	3,6	22,3	3,3	0
Спутник	$b/b//y/y$	2,4	21,8	4,5	0
Галактика	$b/b//y/y$	3,9	19,4	3,7	0
N 263	$b/b//y/y$	2,0	14,2	2,3	0
N33-1/16	$og^c/og^c//y/y$	2,0	14,2	2,3	0
N 34-1/16	$b/b//y/y$	2,0	19,6	2,2	0
Виктория F <sub>1</sub>	$b/b//y/y$	1,8	15,4	2,0	0

В целом анализ данных показал, что группа розовоплодных образцов с аллелями  $b/b$  (нормальное накопление ликопина и каротина) и  $y/y$  (отсутствие халкона в кожице плодов) характеризовалась высоким накоплением ликопина. Образец томата черри Малиновый коктейль имел наибольшее значение данного признака (22,3 мг/100 г). Данный образец был представлен для оценки в ГСИ как сорт с высоким накоплением каротиноидов. Сопоставление значений концентрации ликопина в плодах форм с аллелями  $b/b//YY$  (Старт F<sub>1</sub>) и  $b/b//y/y$  (Виктория, Галактика, Спутник) показало, что у форм без накопления халкона концентрация ликопина выше в 3,2–4,5 раза соответственно. Анализ изменения концентрации ликопина под действием  $y$  аллеля сопоставим

с уровнем влияния на данный показатель таких регуляторных генов, как *hp2<sup>dg</sup>* и *gf-3*. Так, увеличение концентрации ликопина у форм со структурным аллелем *b* (Старт F<sub>1</sub>) при сочетании с аллелем *hp2<sup>dg</sup>* (LbP) было в 2,6 раза, при сочетании с аллелем *gf-3* (Черная груша) – в 1,9 раза.

Сравнение данного показателя у форм с аллелями *og<sup>c</sup>/og<sup>c</sup>//Y/Y* (LON<sub>д</sub>) и *og<sup>c</sup>/og<sup>c</sup>//y/y* (N33-1/16) показало увеличение содержания ликопина у форм без накопления халкона в 1,2 раза. Такое воздействие сопоставимо с влиянием аллеля *hp2<sup>dg</sup>*. Так, в плодах форм с комбинациями аллелей *og<sup>c</sup>/og<sup>c</sup>//hp2<sup>dg</sup>/hp2<sup>dg</sup>//Y/Y* (LOPN<sub>д</sub>) и *B/B//hp2<sup>dg</sup>/hp2<sup>dg</sup>//Y/Y* (LBPN<sub>д</sub>) концентрация ликопина была выше, чем у образцов с комбинациями аллелей *og<sup>c</sup>/og<sup>c</sup>//Y/Y* (LON<sub>д</sub>) и *B/B//Y/Y* (Луч) в 1,3 и 1,2 раза соответственно. Меньшее воздействие регуляторных факторов на увеличение концентрации ликопина в плодах при сочетании с аллелем *og<sup>c</sup>*, чем при сочетании с аллелем *b*, возможно, связано с тем, что сам аллель *og<sup>c</sup>* обеспечивает высокое накопление данного каротиноида. Полученные результаты подтверждают воздействие рецессивного аллеля у гена *SIMYB12* на увеличение концентрации ликопина в плодах томата. Мы предполагаем, что такое воздействие может быть связано с тем, что как каротиноиды, так и флавоноиды являются вторичными метаболитами и блокирование синтеза одного из веществ может способствовать более активному синтезу других. Данные предположения планируется проверить в дальнейших исследованиях с использованием форм со структурными аллелями активного синтеза проликопина (*t*), β-каротина (*B*) и различными аллелями генов, регулирующих синтез флавоноидов халкона (*Y* и *y*) и антоциана (*Ant1* и *ant1*).

**Заключение.** Изучена эффективность выявления форм с отсутствием флавоноида халкон-нарингенина в розовоплодных и желтоплодных формах томата с помощью ДНК-маркеров к различным полиморфизмам гена *SIMYB12*. Подтверждена тесная связь наличия прозрачной кожицы плодов с делецией в промоторной области гена *SIMYB12*. Установлена наибольшая эффективность выявления рецессивного аллеля у регуляторного гена *SIMYB12*, приводящего к нарушению синтеза халкон-нарингенина и прозрачности кожицы, сочетанием маркеров MYB12-603del-aF1/603del-aR6 (Myb-603del aF1/R6) и MYB12-603del-aF1/603del-aR5 (Myb12 aF1/R5). Использование данных маркеров позволяет выделять формы с рецессивным аллелем *y*. Сочетание данного аллеля с аллелями гена ликопин-β-циклазы *beta* и *old gold crimson* позволяет отобрать розовые и малиновые формы соответственно. У образцов томата с желтой и оранжевой окраской плодов аллель *y* обеспечивает бледные оттенки основных окрасок, обусловленных генами биосинтеза каротиноидов (аллели генов каротиноидов – *yellow flesh*, *tangerin*, *Beta*). Выявлено наличие SNP T → C гена *SIMYB12* (позиция 71476848 хромосомы 1) у 80 % образцов с прозрачной кожицей плодов оцениваемой коллекции. Показано значительное влияние рецессивного аллеля у гена *SIMYB12* на увеличение концентрации ликопина в плодах томата. С использованием методов MAS по генам качества плодов, в том числе по гену *SIMYB12*, создан и включен в Государственный реестр сорт томата черри Малиновый коктейль с высоким накоплением ликопина.

### Список использованных источников

1. Томат / А. В. Кильчевский [и др.] // Генетические основы селекции растений: в 4 т. – Минск, 2010. – Т. 2. – С. 422–508.
2. ДНК-типирование генов качества плодов и устойчивости к болезням томата. Методические рекомендации / А. В. Кильчевский [и др.]. – Минск, 2016. – 41 с.
3. Genetic bases of tomato marker-assisted selection in Belarus / O. G. Babak [et al.] // Eurobiotech J. – 2018. – Vol. 2, N 2. – P. 128–135. <https://doi.org/10.2478/ebtj-2018-0017>
4. Biochemical and Molecular Analysis of Pink Tomatoes: Deregulated Expression of the Gene Encoding Transcription Factor *SIMYB12* Leads to Pink Tomato Fruit Color / A.-R. Ballester [et al.] // Plant Physiol. – 2010. – Vol. 152, N 1. – P. 71–84. <https://doi.org/10.1104/pp.109.147322>
5. Genomic analyses provide insights into the history of tomato breeding / T. Lin [et al.] // Nat. Genet. – 2014. – Vol. 46, N 11. – P. 1220–1226. <https://doi.org/10.1038/ng.3117>
6. Sequence Variation in *SIMYB12* is Associated with Fruit Peel Color in Pink Tomato Cultivars / K. Veerappan [et al.] // Hortic. Environ. Biotechnol. – 2016. – Vol. 57, N 3. – P. 274–279. <https://doi.org/10.1007/s13580-016-0041-9>
7. New SNPs and InDel Variations in *SIMYB12* Associated with Regulation of Pink Color in Tomato / H. J. Jung [et al.] // Tropical Plant Biology. – 2017. – Vol. 10, N 1–2. – P. 126–133. <https://doi.org/10.1007/s12042-017-9191-x>
8. Single Nucleotide Polymorphisms linked to the *SIMYB12* Gene that Controls Fruit Peel Color in Domesticated Tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) / B. Kim [et al.] // Kor. J. Hort. Sci. Technol. – 2015. – Vol. 33, N 4. – P. 566–574. <https://doi.org/10.7235/hort.2015.15032>

9. An alternative pathway to b-carotene formation in plant chromoplasts discovered by map-based cloning of *Beta* and *old-gold* color mutations in tomato / G. Ronen [et al.] // PNAS. – 2000. – Vol. 97, N 20. – P. 11102–11107. <https://doi.org/10.1073/pnas.190177497>
10. A MADS-box gene necessary for fruit ripening at the tomato ripening-inhibitor (Rin) locus / J. Vrebalov [et al.] // Science. – 2002. – Vol. 296, N 5566. – P. 343–345. <https://doi.org/10.1126/science.1068181>
11. Transcriptional profiling of high pigment-2<sup>de</sup> tomato mutant links early fruit plastid biogenesis with its overproduction of phytonutrients / I. Kolotilin [et al.] // Plant Physiol. – 2007. – Vol. 145, N 2. – P. 389–401. <https://doi.org/10.1104/pp.107.102962>
12. Amino acid substitutions in homologs of the Stay-Green protein are responsible for the green-flesh and chlorophyll retainer mutations of tomato and pepper / C. S. Barry [et al.] // Plant Physiol. – 2008. – Vol. 147, N 1. – P. 179–187. <https://doi.org/10.1104/pp.108.118430>
13. Количественная тонкослойная хроматография в оценке каротиноидного состава томата *Solanum lycopersicum* / Н. А. Голубкина [и др.] // Овощи России. – 2017. – № 5. – С. 96–99. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2017-5-96-99>
14. Генетические коллекции сельскохозяйственных культур. Томат (*Solanum lycopersicum* L.) и перец (*Capsicum annuum* L.) / А. В. Кильчевский [и др.] // Генетические ресурсы растений в Беларуси: мобилизация, сохранение, изучение и использование. – Минск, 2019. – С. 167–175.

## References

1. Kilchevsky A. V., Khotyleva L. V., Dobrodkin M. M., Skorina V. V., Kogotko L. G., Nikonovich T. V., Babak O. G., Pugacheva I. G., Leschina N. Yu., Ivantsova E. Yu., Tarutina L. A., Schur A. V., Kruk A. V., Malyshev S. V., Mishin L. A., Bazhanov D. P., Nekrashevich N. A., Bazhanova A. A., Lemesh V. A., Grushetskaya Z. E. Tomato. *Genetic basis of plant breeding*. Vol. 2. Minsk, 2010, pp. 422–508 (in Russian).
2. Kilchevsky A. V., Babak O. G., Malyshev S. V., Adzhieva V. F., Nekrashevich N. A., Yatsevich K. K., Kondratyuk A. V. *DNA typing of genes for fruit quality and resistance to tomato diseases. Guidelines*. Minsk, 2016. 41 p. (in Russian).
3. Babak O. G., Nekrashevich N. A., Yatsevich K. K., Malyshev S. V., Kilchevsky A. V. Genetic bases of tomato marker-assisted selection in Belarus. *Eurobiotech Journal*, 2018, vol. 2, no. 2, pp. 128–135. <https://doi.org/10.2478/ebtj-2018-0017>
4. Ballester A.-R., Molthoff J., de Vos R., Hekkert B., Orzaez D., Fernández-Moreno J., Tripodi P., Grandillo S., Martin C., Heldens J., Ykema M., Granell A., Bovy A. Biochemical and Molecular Analysis of Pink Tomatoes: Deregulated Expression of the Gene Encoding Transcription Factor *SIMYB12* Leads to Pink Tomato Fruit Color. *Plant Physiology*, 2010, vol. 152, no. 1, pp. 71–84. <https://doi.org/10.1104/pp.109.147322>
5. Lin T., Zhu G., Zhang J., Xu X., Yu Q., Zheng Z., Zhang Z., Lun Y., Li S., Wang X., Huang Z., Li J., Zhang C., Wang T., Zhang Y., Wang A., Zhang Y., Lin K., Li C., Xiong G., Xue Y., Mazzucato A., Causse M., Fei Z., Giovannoni J. J., Chetelat R. T., Zamir D., Städler T., Li J., Ye Z., Du Y., Huang S. Genomic analyses provide insights into the history of tomato breeding. *Nature Genetics*, 2014, vol. 46, no. 11, pp. 1220–1226. <https://doi.org/10.1038/ng.3117>
6. Veerappan K., Jung H. J., Hwang I., Kho K. H., Chung M. Y., Nou I. S. Sequence Variation in *SIMYB12* is Associated with Fruit Peel Color in Pink Tomato Cultivars. *Horticulture, Environment and Biotechnology*, 2016, vol. 57, no. 3, pp. 274–279. <https://doi.org/10.1007/s13580-016-0041-9>
7. Jung H. J., Veerappan K., Hwang I., Goswami G., Chung M. Y., Nou I. S. New SNPs and InDel Variations in *SIMYB12* Associated with Regulation of Pink Color in Tomato. *Tropical Plant Biology*, 2017, vol. 10, no. 2–3, pp. 126–133. <https://doi.org/10.1007/s12042-017-9191-x>
8. Kim B., Kim N., Kang J., Choi Y., Sim S.-C., Min S. R., Park Y. Single Nucleotide Polymorphisms linked to the *SIMYB12* Gene that Controls Fruit Peel Color in Domesticated Tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.). *Korean Journal of Horticultural Sciences Technology*, 2015, vol. 33, no. 4, pp. 566–574. <https://doi.org/10.7235/hort.2015.15032>
9. Ronen G., Carmel-Goren L., Zamir D., Hirschberg J. An alternative pathway to b-carotene formation in plant chromoplasts discovered by map-based cloning of *Beta* and *old-gold* color mutations in tomato. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, vol. 97, no. 20, pp. 11102–11107. <https://doi.org/10.1073/pnas.190177497>
10. Vrebalov J., Ruzinsky D., Padmanabhan V., White R., Medrano D., Drake R., Schuch W., Giovannoni J. A MADS-box gene necessary for fruit ripening at the tomato ripening-inhibitor (Rin) locus. *Science*, 2002, vol. 296, no. 5566, pp. 343–345. <https://doi.org/10.1126/science.1068181>
11. Kolotilin I., Koltai H., Tadmor Y., Bar-Or C., Reuveni M., Meir A., Nahon S., Shlomo H., Chen L., Levin I. Transcriptional profiling of high pigment-2<sup>de</sup> tomato mutant links early fruit plastid biogenesis with its overproduction of phytonutrients. *Plant Physiology*, 2007, vol. 145, no. 2, pp. 389–401. <https://doi.org/10.1104/pp.107.102962>
12. Barry C. S., McQuinn R. P., Chung M.-Y., Besuden A., Giovannoni J. J. Amino acid substitutions in homologs of the Stay-Green protein are responsible for the green-flesh and chlorophyll retainer mutations of tomato and pepper. *Plant Physiology*, 2008, vol. 147, no. 1, pp. 179–187. <https://doi.org/10.1104/pp.108.118430>
13. Golubkina N. A., Molchanova A. V., Tareeva M. M., Babak O. G., Nekrashevich N. A., Kondratyeva I. Yu. Quantitative thin layer chromatography for evaluation of carotenoid composition of tomatoes *Solanum lycopersicum*. *Vegetable crops of Russia*, 2017, no. 5, pp. 96–99 (in Russian). <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2017-5-96-99>
14. Kilchevsky A. V., Babak O. G., Adzhieva V. F., Nikitinskaya T. V., Nekrashevich N. A., Yatsevich K. K. Genetic collections of crops. Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and Pepper (*Capsicum annuum* L.). *Geneticheskie resursy rastenii v Belarusi: mobilizatsiya, sokhranenie, izuchenie i ispol'zovanie* [Plant genetic resources in Belarus: mobilization, conservation, study and use]. Minsk, 2019, pp. 167–175 (in Russian).

**Информация об авторах**

*Бабак Ольга Геннадьевна* – канд. биол. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: o.babak@igc.by.

*Игнатова Светлана Ильинична* – д-р с.-х. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Федеральный научный центр овощеводства (дер. Веряя, стр. 500, 140153, Раменский р-н, Московская область, Российская Федерация). E-mail: svil@bk.ru.

*Голубкина Надежда Александровна* – д-р с.-х. наук, гл. науч. сотрудник. Федеральный научный центр овощеводства (ул. Селекционная, д. 14, 143072, поселок ВНИИССОК, Одинцовский район, Московская обл., Российская Федерация). E-mail: segolubkina45@gmail.com.

*Некрасевич Наталья Александровна* – науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: n.nekrashevich@igc.by.

*Анисимова Наталья Владимировна* – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: n.anisimova@igc.by.

*Никитинская Татьяна Владимировна* – науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nikitinskaja@yandex.ru.

*Яцевич Констанция Константиновна* – науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yakon-kon@yandex.ru.

*Кильчевский Александр Владимирович* – академик, д-р биол. наук, профессор, научный руководитель лаборатории. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kilchev@presidium.bas-net.by.

**Information about the authors**

*Babak Olga G.* – Ph. D. (Biology), Assistant Professor, Leading researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Science of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: o.babak@igc.by.

*Ignatova Svetlana I.* – D. Sc. (Agrarian), Professor, Chief researcher. Federal State Scientific Center for Vegetable Crops (500, Vereya village, 140153, Ramensky district, Moscow region, Russian Federation). E-mail: svil@bk.ru.

*Golubkina Nadezhda A.* – D. Sc. (Agrarian), Chief researcher. Federal State Scientific Center for Vegetable Crops (14, Selektionnaya Str., 143072, VNISSOK, Odintsovo district, Moscow region, Russian Federation). E-mail: segolubkina45@gmail.com.

*Nekrashevich Nataliya A.* – Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Science of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: n.nekrashevich@igc.by.

*Anisimova Nataliya Vladimirovna* – Ph. D. (Biology), Senior researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Science of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: n.anisimova@igc.by.

*Nikitinskaya Tatiana V.* – Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Science of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nikitinskaja@yandex.ru.

*Yatsevich Konstanciya K.* – Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Science of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yakon-kon@yandex.ru.

*Kilchevsky Alexander V.* – Academician, D. Sc. (Biology), Professor, Scientific Head of the Laboratory. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Science of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kilchev@presidium.bas-net.by.

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

**МЕДИЦИНА**  
**MEDICINE**

УДК 615.322:615.451.232+616.36-002.1+577.15  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-713-722>

Поступило в редакцию 28.09.2020  
Received 28.09.2020

**И. П. Сутько, А. Г. Шляхтун, О. В. Титко, Н. В. Янкевич, А. В. Колодко,  
П. Г. Телегин, И. В. Зверинский, И. Н. Семененя**

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

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНАЦИИ СИЛИМАРИНА  
И БЕРБЕРИНА В СОСТАВЕ САМОЭМУЛЬГИРУЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ  
ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ПОРАЖЕНИИ ПЕЧЕНИ ПАРАЦЕТАМОЛОМ**

*(Представлено членом-корреспондентом Н. С. Сердюченко)*

**Аннотация.** Изучены гепатозащитные свойства комбинации силимарина и растительного алкалоида берберина при экспериментальном поражении печени парацетамолом. Силимарин получали из семян расторопши пятнистой. Проведена оптимизация условий экстракционного извлечения флаволигнанов (силимарина). В качестве экстрагентов использовали 70 %-ный этиловый спирт, этилацетат и воду. Показано, что оптимальными условиями экстракции флаволигнанов для получения их максимального выхода является спиртовая экстракция в аппарате Сокслета. Установлено, что сочетанное применение силимарина с берберинном в большей степени по сравнению с их действием в отдельности стабилизирует мембраны гепатоцитов и предотвращает нарушение их целостности при токсическом поражении печени парацетамолом. Выявлено, что силимарин и берберин в составе разработанной самоэмульгирующей системы в большей мере предотвращают дистрофические изменения гепатоцитов и некрозы в ткани печени, снижают степень выраженности гиперферментемии в сыворотке крови крыс, предотвращают нарушение активности тиоредоксинредуктазы и ферментов глутатионовой антиоксидантной системы и тем самым эффективнее предотвращают нарушение функциональных способностей гепатоцитов.

**Ключевые слова:** силимарин, расторопша пятнистая, берберин, самоэмульгирующаяся система, токсический гепатит, парацетамол

**Для цитирования.** Оценка эффективности применения комбинации силимарина и берберина в составе самоэмульгирующей системы при экспериментальном поражении печени парацетамолом / И. П. Сутько [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 713–722. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-713-722>

**Iryna P. Sutsko, Aliaksei G. Shlyahtun, Aksana V. Titko, Nadezhda V. Yankevich, Anastasia V. Kolodko,  
Pavel G. Telegin, Igor V. Zverinsky, Igor N. Semeneya**

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

**EVALUATION OF SILYMARIN AND BERBERINE EFFICIENCIES IN THE SELF-EMULSIFYING DRUG  
DELIVERY SYSTEM IN PARACETAMOL-INDUCED EXPERIMENTAL TOXIC LIVER INJURY**

*(Communicated by Corresponding Member Nikolay S. Serdyuchenko)*

**Abstract.** The hepatoprotective properties of the silymarin and the plant alkaloid berberine combination in experimental paracetamol-induced liver damage were studied. Silymarin was obtained from milk thistle seeds. The conditions for extraction of flavonolignans (silymarin) were optimized. 70 % ethyl alcohol, ethyl acetate and water were used as extractants. It was shown that the optimal conditions for the extraction of flavonolignans in order to obtain the maximum yield of flavonolignans were alcohol extraction in a Soxhlet apparatus. The experiment showed that the combined of silymarin and berberine was greater than their individual actions, which most effectively permitted stabilization of hepatocyte membranes and prevented altering their integrity in paracetamol-induced toxic liver damage. The self-emulsifying system with silymarin and berberine

to a greater extent a significant extent prevented dystrophic changes in hepatocytes and necrosis in liver tissue, reduced hyperfermentemia in rat blood serum, prevented disturbance in the activity of thioredoxin reductase and enzymes of the glutathione antioxidant system and there by more effectively prevented hepatocyte functional impairment.

**Keywords:** silymarin, milk thistle, berberine, self-emulsifying system, toxic hepatitis, paracetamol

**For citation:** Sutsko I. P., Shlyahatun A. G., Titko A. V., Yankevich N. V., Kolodko A. V., Telegin P. G., Zverinsky I. V., Semenenya I. N. Evaluation of silymarin and berberine efficiencies in the self-emulsifying drug delivery system in paracetamol-induced experimental toxic liver injury. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 713–722. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-713-722>

**Введение.** Среди соединений с гепатопротекторным действием многочисленную группу составляют вещества растительного происхождения, способствующие нормализации метаболических процессов и функций печени при ее повреждениях. Использование растительного сырья для производства лекарственных средств (ЛС) и биологически активных добавок гепатопротекторного действия в значительной степени связано с широким спектром действия биологически активных веществ растений, доступностью их в ценовом отношении, минимальным количеством побочных эффектов.

Хорошо известен своими гепатопротекторными свойствами силимарин – экстракт плодов и семян расторопши пятнистой (*Silybum marianum* (L.) Gaertn), представляющий собой комплекс флаволигнанов. Доказана терапевтическая эффективность силимарина как антидота фаллоидина и аманитина – ядов гриба бледной поганки. В настоящее время активно изучаются новые свойства и возможности применения флаволигнанов расторопши пятнистой, в частности, их противовоспалительное, иммуномодулирующее, противоопухолевое и кардиопротекторное действие [1; 2].

Однако эффективность применения силимарина ограничивается его относительно низкой биодоступностью при пероральном применении из-за липофильной природы, плохой растворимости в воде (0,04 мг/мл) и, как следствие, недостаточно полной абсорбции в кишечнике (20–50 %) [2].

Берберин – изохинолиновый алкалоид растений ряда семейств, включая Berberidaceae, Papaveraceae, Ranunculaceae, Rutaceae и Annonaceae. В настоящее время установлено его антиоксидантное, противовоспалительное, желчегонное, гиполипидемическое, гипогликемическое, антиаритмическое, антипролиферативное и противоопухолевое действие [3]. Показаны его защитные эффекты при поражениях печени различного генеза. Результаты проведенных нами ранее исследований подтверждают гепатопротекторный потенциал берберина при моделировании холестаза [4] и частичной гепатэктомии [5].

Однако несмотря на то что берберин обладает широким спектром биологической активности и низкой токсичностью, его применение ограничивается низкой биодоступностью (менее 1 %) при пероральном применении [6]. Известно, что всасывание берберина в желудочно-кишечном тракте лимитируется гликопротеином-P (Pgp), представляющим собой АТФ-зависимый трансмембранный белок, который осуществляет эффлюкс большого спектра ЛС из клеток и тем самым снижает их эффективность. Ингибирующее действие на Pgp известно для силимарина [7].

Установленная нами и другими авторами более высокая эффективность совместного применения различных гепатопротекторов, а также известное свойство силимарина оказывать ингибирующее действие на Pgp, послужили основанием для изучения гепатопротекторных свойств комбинации силимарина и берберина.

В настоящее время применяется ряд технологических приемов для повышения растворимости и, следовательно, улучшения биодоступности ЛС. Особое место среди них занимают так называемые самоэмульгирующиеся системы (СЭС, или SEDDS (Self-Emulsifying Drug Delivery System)). Они являются специализированными формами доставки ЛС, защищающими лекарственные вещества от превращений в желудке и увеличивающими их растворимость в водной фазе желудочно-кишечного тракта, тем самым повышая биологическую доступность ЛС. СЭС обычно состоят из нескольких компонентов: чаще всего это различные масла, поверхностно-активные вещества (ПАВ) и органические соразтворители. При попадании СЭС в желудочную и кишечную среду вследствие смешивания с водной фазой происходит образование эмульсии

«масло в воде», содержащей липидные капли диаметром 100–300 нм с лекарственным веществом [8]. СЭС являются стабильными системами благодаря наличию в их составе ПАВ и соразтворителей и значительно превосходят по этому параметру простые эмульсии.

При поражениях печени, в частности при наличии воспалительного процесса, невысокая биодоступность силимарина и его отдельных компонентов еще больше снижается. Среди разных видов гепатопатологии высокий удельный вес занимают токсические поражения, в том числе вызванные употреблением лекарственных препаратов. При этом особое значение в связи с тяжестью клинического течения и наибольшей распространенностью имеет парацетамол. Парацетамол (N-ацетил-п-аминофенол, или ацетаминофен) в терапевтических дозах является достаточно эффективным анальгетиком/антипиретиком и широко используется во всем мире. Однако однократный прием большой дозы парацетамола либо его длительное употребление в меньших дозах при повышенной чувствительности к препарату, злоупотреблении алкоголем, неправильном режиме питания или при сочетании с препаратами, замедляющими его метаболизм, приводят к повреждениям печени, прогрессирующим вплоть до печеночной недостаточности, что является главной причиной лекарственных поражений печени во многих странах [9]. К примеру, в США ежегодно около 30 тыс. человек госпитализируется с острой печеночной недостаточностью, вызванной приемом парацетамола и около 500 смертельных случаев регистрируется от его абсолютной или относительной передозировки [10].

Целью нашей работы стала оптимизация условий получения силимарина из семян расторопши пятнистой (*Silybum marianum* (L.) Gaertn.), разработка СЭС для флаволигнанов расторопши пятнистой (силимарина) и берберина и анализ гепатозащитного действия силимарина и берберина в составе СЭС и в свободном виде при токсическом гепатите, вызванном парацетамолом у крыс.

**Материалы и методы исследования.** Силимарин получали экстракционными методами из семян расторопши пятнистой. С целью достижения максимального выхода флаволигнанов проводили оптимизацию условий их экстракционного извлечения. В качестве экстрагентов использовали 70 %-ный этиловый спирт, этилацетат и воду.

Спиртовую экстракцию проводили методом мацерации при комнатной температуре и 60 °С трижды, а также в аппарате Сокслета (однократно) в течение 72 ч. После экстракции проводили отгонку спирта. Для удаления липофильных соединений полученный экстракт обрабатывали дважды гексаном. Перед экстракцией этилацетатом семена расторопши пятнистой обрабатывали гексаном, а затем сушили под вакуумом при комнатной температуре. Экстракцию этилацетатом проводили при комнатной температуре в течение 72 ч. Отгонку этилацетата из экстракта осуществляли с использованием ротационного испарителя под вакуумом. Водную экстракцию проводили при температуре 90 °С в течение 24 ч. Экстракт концентрировали на вакуумном ротационном испарителе.

Осаждение общей фракции флаволигнанов проводили 0,1 %-ным раствором соляной кислоты. Для полного осаждения флаволигнанов раствор оставляли на 24 ч при температуре 4 °С. Осадок отфильтровывали и промывали дистиллированной водой до нейтрального pH. Сушку флаволигнанов проводили под вакуумом при температуре 30 °С.

Содержание силимарина определяли модифицированным спектрофотометрическим методом в ультрафиолетовом диапазоне при длине волны 293 нм. Подлинность выделенных флаволигнанов из семян расторопши пятнистой подтверждали методом спектрофотометрии в УФ-области с использованием стандартного образца силимарина (Sigma-Aldrich, США).

При разработке СЭС выбор ее компонентов и типа СЭС во многом определили свойства силимарина и берберина. При этом учитывали токсичность потенциальных компонентов, опыт их использования, растворяющую способность, смешиваемость, самодиспергируемость. На основании фазовых диаграмм выбирали комбинации компонентов СЭС с наименьшим количеством ПАВ, при котором происходило самоэмульгирование. Оценивали физико-химические свойства выбранных комбинаций. Полученная СЭС для силимарина и берберина содержала соответственно олеиновую кислоту в качестве липидной фазы, твин-80 в качестве ПАВ и полиэтиленгликоль-400 в качестве соразтворителя. Разработанную СЭС в дальнейшем использовали для

сравнительного анализа гепатопротекторного действия силимарина и берберина в составе СЭС и в свободном виде при токсическом гепатите у крыс.

В работе использовали взрослых крыс-самцов линии Wistar массой 200–220 г, содержащихся на стандартном рационе вивария Института биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси. Крыс распределяли в равные по количеству животных группы методом случайной выборки. Каждая группа включала 10 особей. Все эксперименты выполнялись в соответствии с этическими нормами, а также правилами проведения научных работ с использованием экспериментальных животных в научных исследованиях согласно рекомендациям и требованиям «Всемирного общества защиты животных (WSPA)» и «Европейской конвенции по защите экспериментальных животных» (Страсбург, 1986).

Острое токсическое поражение печени вызывали однократным внутрижелудочным (в/ж) введением парацетамола в крахмальной суспензии в дозе 2 мг/кг массы тела.

Животные экспериментальных групп получали в/ж 0,5 %-ный раствор крахмала, либо берберин (80 мг/кг) в 0,5 %-ном растворе крахмала, либо силимарин (100 мг/кг) в 0,5 %-ном растворе крахмала, либо комбинацию силимарина (50 мг/кг) и берберина (40 мг/кг) в 0,5 %-ном растворе крахмала, либо комбинацию силимарина (50 мг/кг) и берберина (40 мг/кг) в составе разработанной СЭС из расчета 15 мл/кг массы тела. Животным контрольных групп в/ж вводили 0,5 %-ный раствор крахмала из расчета 15 мл/кг массы тела.

Препараты вводили ежедневно один раз в день на протяжении 7 суток до введения парацетамола. Через сутки после введения парацетамола животных декапитировали, брали образцы печени, собирали кровь и получали сыворотку, готовили гомогенаты печени.

О характере и степени выраженности поражения печени судили по активности в сыворотке крови аланин- и аспартатаминотрансфераз (АлАТ и АсАТ),  $\gamma$ -глутамилтранспептидазы (ГГТП), щелочной фосфатазы (ЩФ), содержанию триацилглицеролов, показателю тимоловой пробы, определение которых проводили с использованием соответствующих сертифицированных наборов реагентов.

Для оценки состояния антиоксидантной системы печени определяли активность глутатионредуктазы (GR, КФ 1.6.4.2) [11], глутатионпероксидазы (GPx, КФ 1.11.1.9) [11], глутатион-S-трансферазы (GST, КФ 2.5.1.18) [11], каталазы (КФ 1.11.1.6) [11], тиоредоксинредуктазы (TrxR, КФ 1.8.1.9) [12]. Определяли концентрацию продуктов перекисного окисления липидов (содержание ТБК-активных продуктов и диеновых конъюгатов) в печени [11]. Активность НАДФ-зависимой изоцитратдегидрогеназы (НАДФ-ИЦДГ, КФ 1.1.1.42) оценивали по скорости восстановления НАДФ в ходе превращения изоцитрата в 2-оксоглутарат [13]. Содержание свободных сульфгидрильных (SH-) групп определяли в классической реакции Элмана. Величины показателей рассчитывали на 1 мг белка, определяемого по методу Лоури.

Для гистологических исследований образцы печени экспериментальных животных фиксировали по Бродскому.

Полученные данные были обработаны с помощью статистического пакета GraphPad Prism v.8 с использованием однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) и теста множественного сравнения Тьюки. Полученные результаты проверяли на нормальность распределения с помощью критерия Шапиро–Уилка. Количественные данные представлены в виде среднего арифметического ( $M$ ) и ошибки среднего арифметического ( $\pm m$ ). Различия между сравниваемыми величинами считали статистически значимыми при  $p < 0,05$ .

**Результаты и их обсуждение.** Анализ выхода общей фракции флаволигнанов из семян расторопши пятнистой при различных экстракционных методах показал наибольший выход флаволигнанов (9,8 %) при их спиртовой экстракции в аппарате Сокслета (табл. 1).

Таким образом, для дальнейших исследований силимарин получали из семян расторопши пятнистой спиртовой экстракцией. Содержание флаволигнанов в выделенной фракции, используемой в данной работе, составило 92,0 %.

Об эффективности совместного применения силимарина и берберина при экспериментальном остром токсическом поражении печени, вызванном парацетамолом, судили по изменению

Т а б л и ц а 1. Выход общей фракции флаволигнанов из семян расторопши пятнистой при экстракции этиловым спиртом, этилацетатом и водой

Table 1. Yield of the total fraction of flavolignans from seeds of milk thistle upon extraction with ethyl alcohol, ethyl acetate or water

Экстрагент Extractant		Выход флаволигнанов (%) Flavolignan yield (%)
70 %-ный этиловый спирт	методом мацерации	2,8
	в аппарате Сокслета	9,8
Этилацетат		2,5
Вода		1,2

маркерных показателей в сыворотке крови. Гепатопротекторное действие оказывали берберин, силимарин, а также их комбинация. При этом сочетанное действие берберина и силимарина, судя по изменению активности АЛат, АсАТ и ГГТП, в большей степени по сравнению с их действием в отдельности способствовало стабилизации мембран гепатоцитов и предотвращению нарушения их целостности (рис. 1).

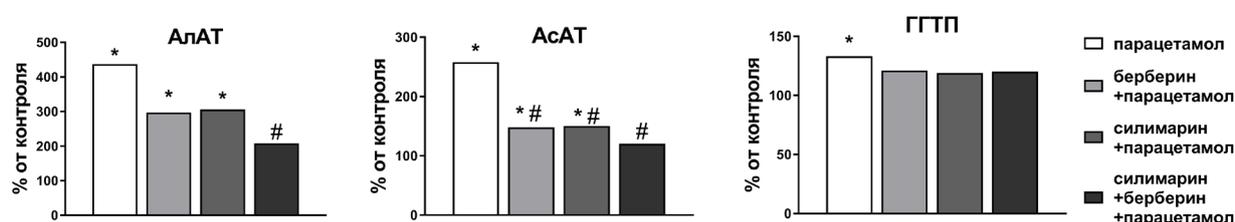


Рис. 1. Изменение активности АЛат, АсАТ и ГГТП в сыворотке крови крыс (в % относительно контрольных значений) с токсическим гепатитом, вызванным введением парацетамола (однократно, 2 мг/кг), при введении силимарина (0,2 ммоль/кг), берберина (0,2 ммоль/кг) и их комбинации (силимарин 0,1 ммоль/кг и берберин 0,1 ммоль/кг). Достоверность различий ( $p < 0,05$ ): \* – относительно контроля, # – относительно группы «Парацетамол»

Fig. 1. Change in the activity of ALT, AST and GGT in rat serum (in % relative to control values) with toxic hepatitis caused by the administration of paracetamol (singly, 2 mg/kg), and pretreated with silymarin (0.2 mmol/kg), berberine (0.2 mmol/kg) and their combinations (silymarin 0.1 mmol/kg and berberine 0.1 mmol/kg). \* –  $p < 0.05$  vs. control; # –  $p < 0.05$  vs. “Paracetamol” group

Далее проводили сравнительный анализ гепатопротекторного действия комбинации силимарина и берберина в составе разработанной СЭС доставки и в свободном виде на модели токсического гепатита у крыс, вызванного однократным в/ж введением парацетамола. Согласно полученным результатам, парацетамол оказывал выраженное гепатотоксическое действие на экспериментальных животных. Развивался цитолитический синдром, о чем свидетельствовало повышение в крови активности АЛат и АсАТ соответственно на 197,4 и 74,1 % по сравнению с контрольной группой. На 49,3 % увеличивалась в сыворотке крови активность ГГТП, на 92,3 % – показатель пробы тимолового помутнения, на 22,5 % повышалось содержание триацилглицеролов относительно контрольных значений (табл. 2).

В печени животных отмечено накопление продуктов перекисного окисления липидов (содержание ТБК-активных продуктов и диеновых конъюгатов увеличилось соответственно на 28,7 и 40,0 % относительно контроля) с повышением активности каталазы на 31,9 % (табл. 3).

Воздействие парацетамола в токсической дозе (однократно, в/ж, 2 мг/кг) сопровождалось снижением содержания свободных SH-групп, представленных в основном восстановленным глутатионом, в печени крыс на 63,5 % относительно контрольных значений (табл. 3), что, вероятно, связано с образованием больших количеств токсического метаболита парацетамола N-ацетил-п-аминобензохинона. Как известно, парацетамол метаболизируется преимущественно в печени по трем основным путям: глюкуронидирования и сульфатирования с образованием водорастворимых конъюгированных метаболитов, выводимых почками, а также микросомального окисления ферментами печени. В последнем случае образуется токсический промежуточный метабо-

Т а б л и ц а 2. Биохимические показатели в сыворотке крови крыс с токсическим гепатитом, вызванным парацетамолом (однократно, в/ж, 2 мг/кг), при введении силимарина (0,1 ммоль/кг) и берберина (0,1 ммоль/кг) в свободном виде и в составе разработанной СЭС

Table 2. Biochemical indicators in blood serum of rats with paracetamol-induced toxic hepatitis (singly, i. g., 2 mg/kg), with silymarin (0.1 mmol/kg) and berberine (0.1 mmol/kg) in the free form and in the SEDDS treatments

Показатель Indicator	Экспериментальная группа Experimental group				
	Контроль Control	СЭС (основа) SEDDS (base)	Парацетамол Paracetamol	Силимарин + берберин в крахмале + парацетамол Silymarin + berberine in starch + paracetamol	Силимарин + берберин в СЭС + парацетамол Silymarin + berberine in SEDDS + paracetamol
АлАТ, Е/л	45,69 ± 6,15	46,50 ± 4,69	135,90 ± 11,8 <sup>а*</sup>	99,39 ± 15,93 <sup>а*</sup>	83,24 ± 16,31 <sup>б</sup>
АсАТ, Е/л	162,60 ± 10,96	165,00 ± 11,29	283,10 ± 33,7 <sup>а*</sup>	254,00 ± 45,63	228,60 ± 26,90
ГГТП, Е/л	8,91 ± 0,79	9,22 ± 0,58	13,30 ± 0,92 <sup>а*</sup>	11,91 ± 0,98	11,67 ± 2,78
ЩФ, Е/л	394,70 ± 19,19	438,00 ± 26,93	342,00 ± 21,91	342,00 ± 26,61	397,60 ± 20,50
Тимоловая проба, ед. S-N	0,52 ± 0,10	0,73 ± 0,06	1,00 ± 0,07 <sup>*</sup>	0,89 ± 0,09 <sup>*</sup>	0,82 ± 0,13
Триацил-глицеролы, ммоль/л	1,38 ± 0,07	1,53 ± 0,05	1,69 ± 0,10 <sup>*</sup>	1,58 ± 0,05	1,63 ± 0,04

Примечание. \* –  $p < 0,05$  относительно контроля; а –  $p < 0,05$  относительно группы «СЭС (основа)»; б –  $p < 0,05$  относительно группы «Парацетамол».

Note. \* –  $p < 0.05$  vs. control; а –  $p < 0.05$  vs. the “SEDDS (base)” group; б –  $p < 0.05$  vs. the “Paracetamol” group.

Т а б л и ц а 3. Биохимические показатели в печени крыс с токсическим гепатитом, вызванным парацетамолом (однократно, в/ж, 2 мг/кг), при введении силимарина (0,1 ммоль/кг) и берберина (0,1 ммоль/кг) в свободном виде и в составе разработанной СЭС

Table 3. Biochemical indicators in the rat liver with paracetamol-induced toxic hepatitis (singly, i. g., 2 mg/kg), after administration of silymarin (0.1 mmol/kg) and berberine (0.1 mmol/kg) in free form and in the SEDDS treatments

Показатель Indicator	Экспериментальная группа Experimental group				
	Контроль Control	СЭС (основа) SEDDS (base)	Парацетамол Paracetamol	Силимарин + берберин в крахмале + парацетамол Silymarin + berberine in starch + paracetamol	Силимарин + берберин в СЭС + парацетамол Silymarin + berberine in SEDDS + paracetamol
ТБК-активные продукты, нмоль/мг белка	64,27 ± 2,28	69,53 ± 3,60	82,69 ± 4,79 <sup>*</sup>	75,39 ± 5,97	77,37 ± 4,29
Дниевые конъюгаты, нмоль/г белка	0,10 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,14 ± 0,01 <sup>*</sup>	0,12 ± 0,01	0,12 ± 0,01
Каталаза, мкмоль H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /мг белка	217,70 ± 11,71	201,50 ± 12,41	287,10 ± 18,67 <sup>а*</sup>	245,80 ± 11,24	242,80 ± 16,62
GR, нмоль НАДФН/мин/мг белка	66,81 ± 2,75	48,28 ± 6,27 <sup>*</sup>	45,57 ± 4,51 <sup>*</sup>	44,07 ± 4,58 <sup>*</sup>	46,09 ± 3,76 <sup>*</sup>
GPx, мкмоль GSH/мин/мг белка	58,07 ± 6,27	52,91 ± 4,71	36,78 ± 4,32 <sup>*</sup>	42,47 ± 3,66	49,08 ± 4,54
GST, нмоль ХДНБ/мин/мг белка	378,9 ± 19,92	355,40 ± 24,58	285,10 ± 5,73 <sup>*</sup>	310,60 ± 19,12	307,20 ± 34,18
ГгхR, нмоль ДТНБ/мин/ мг белка	71,77 ± 3,44	68,30 ± 3,19	47,81 ± 3,99 <sup>а*</sup>	62,93 ± 4,85	68,46 ± 3,30 <sup>б</sup>
SH-группы свободные, нмоль/мг белка	18,36 ± 1,29	17,93 ± 1,82	6,71 ± 0,65 <sup>а*</sup>	9,04 ± 1,38 <sup>а*</sup>	10,70 ± 1,74 <sup>а*</sup>
НАДФ-ИЦДГ, нмоль НАДФН/мин/мг белка	6,78 ± 0,31	6,91 ± 0,21	5,96 ± 0,29 <sup>а*</sup>	5,58 ± 0,33 <sup>а*</sup>	6,18 ± 0,15

Примечание. \* –  $p < 0,05$  относительно контроля; а –  $p < 0,05$  относительно группы «СЭС (основа)»; б –  $p < 0,05$  относительно группы «Парацетамол».

Note. \* –  $p < 0.05$  vs. control; а –  $p < 0.05$  vs. the “SEDDS (base)” group; б –  $p < 0.05$  vs. the “Paracetamol” group.

лит N-ацетил-п-аминобензохинон, с действием которого связана гепатотоксичность парацетамола. N-ацетил-п-аминобензохинон в норме связывается с глутатионом и затем экскретируется. Повышенное его образование при больших дозах парацетамола приводит к истощению запасов глутатиона, а сам метаболит ковалентно связывается с альтернативными мишенями, в особенности с белками, с образованием комплексов, вызывающих некроз [14].

Одновременно регистрировали уменьшение активности ферментов редокс-системы глутатиона (активность GR и GPx снижалась соответственно на 31,8 и 36,7 %), снижение активности GST на 24,8 % и активности TrxR на 33,4 % относительно контрольных значений (табл. 3).

Установлено, что силимарин и берберин в составе разработанной СЭС превосходят по эффективности гепатопротекторного действия силимарин и берберин в свободном виде при токсическом гепатите, вызванном парацетамолом. Введение экспериментальным животным силимарина и берберина в составе разработанной СЭС доставки в большей степени по сравнению с их введением в свободном виде препятствовало выходу в кровь АЛАТ (активность фермента была на 38,7 % ниже таковой у крыс без лечения), предупреждало повышение тимоловой пробы (ее уровень в данной экспериментальной группе соответствовал контрольным значениям) (табл. 2). У животных, получавших берберин и силимарин в составе СЭС, активность TrxR в печени соответствовала контрольным значениям и на 43,2 % превышала таковую у животных, не получавших лечения (табл. 3). Это в определенной степени может быть связано с большим ослаблением самоэмульгирующейся композиции с силимарином и берберином токсического действия парацетамола на активность НАДФН-продуцирующих ферментов, в частности НАДФ-ИЦДГ (табл. 3), поскольку лимитирующим фактором эффективной работы системы Trx/TrxR и глутатионовой антиоксидантной системы является уровень НАДФН.

Изученные биохимические показатели сыворотки крови и печени крыс, получавших в течение 7 суток СЭС доставки без силимарина и берберина (основу СЭС), не показали заметных отклонений по сравнению с контрольной группой животных.

Выявленные изменения биохимических показателей, характеризующие функциональное состояние печени крыс при токсическом поражении парацетамолом, были подтверждены данными

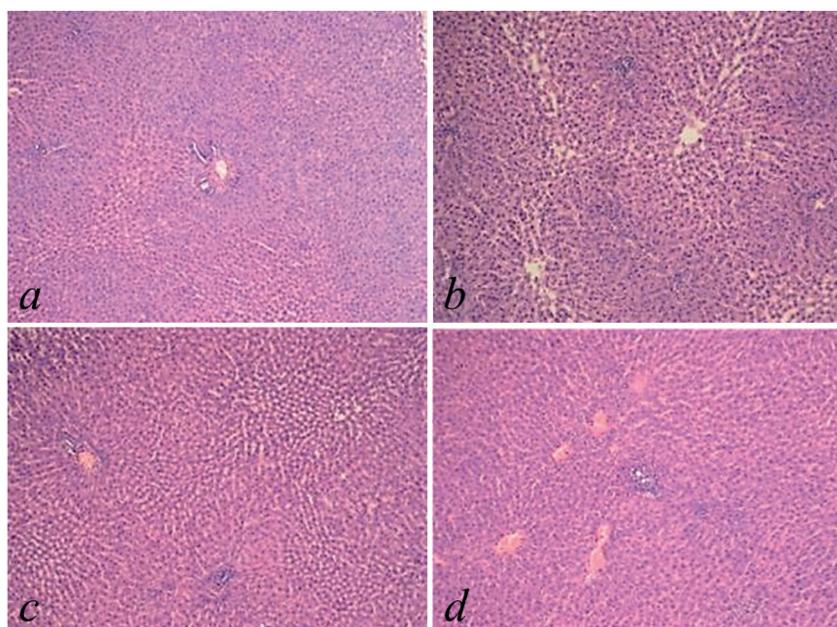


Рис. 2. Гистологическая картина печени контрольных животных (a) и крыс с острым токсическим поражением печени парацетамолом (b), при введении опытными животными силимарина и берберина в свободном виде (c) и в составе разработанной самоэмульгирующейся композиции (d). Окраска гематоксилином и эозином ( $\times 40$ )

Fig. 2. Liver histology of the control animals (a) and rats with acute toxic liver damage with paracetamol (b), after treatment of experimental animals with free silymarin and berberine (c) and as part of the developed self-emulsifying composition (d). Hematoxylin and eosin stain ( $\times 40$ )

гистологического исследования данного органа. У животных контрольной группы структура паренхимы печени была типичной для нормального органа. Введение животным парацетамола в токсической дозе вызвало у всех животных появление очагов некроза, значительную диффузную и фокальную лимфоцитарную инфильтрацию, наблюдалось полнокровие центральных вен, расширение синусоидных капилляров (рис. 2, *b–d*).

Нарушения структуры ткани печени в меньшей степени были выражены у группы животных, получавших силимарин и берберин в крахмале, – участки зернистой дистрофии гепатоцитов выявлялись у 88 % животных, участки некрозов – у 60 %. Появление большого количества гипертрофированных двуядерных клеток отмечено у 75 % животных, тогда как в паренхиме печени у животных без лечения эти нарушения обнаруживали в 100 % случаев. Значительное улучшение гистологической картины ткани печени по сравнению с группой без лечения обнаружены у животных, получавших силимарин и берберин в составе СЭС, – участки некрозов выявлялись лишь у 25 % животных и только у 50 % животных отмечено появление значительного количества гипертрофированных двуядерных клеток.

Можно полагать, что бóльшая эффективность силимарина и берберина в составе СЭС при остром токсическом поражении печени парацетамолом у крыс по сравнению с их действием в свободном виде связана с повышением их биодоступности. Так, проведенное нами ранее исследование фармакокинетики берберина и силимарина в свободном виде и в составе полученной СЭС показало увеличение биодоступности берберина при его применении в комбинации с силимарином, а также увеличение биодоступности берберина и силимарина в составе разработанной СЭС [15].

**Заключение.** Проведена оптимизация условий экстракционного извлечения флаволигнанов из семян расторопши пятнистой (силимарина) с целью достижения максимального выхода флаволигнанов. Установлено, что оптимальными условиями получения флаволигнанов является их однократная экстракция в аппарате Сокслета с применением в качестве экстрагента 70 %-ного этилового спирта. В ходе эксперимента показано, что сочетанное действие силимарина и берберина в большей степени по сравнению с их действием в отдельности стабилизирует мембраны гепатоцитов и предотвращает нарушение их целостности при токсическом поражении печени парацетамолом. Предварительное введение силимарина и берберина в составе самоэмульгирующей композиции при остром токсическом поражении печени парацетамолом у крыс в большей степени по сравнению с их введением в свободном виде ослабляет гепатотоксическое действие парацетамола, что связано с увеличением их биодоступности в составе СЭС при пероральном применении. Результаты проведенного исследования могут служить обоснованием дальнейшего изучения эффективности сочетанного применения гепатопротекторов разной природы и разработки готовых лекарственных форм на основе СЭС, обладающих повышенной биодоступностью.

#### Список использованных источников

1. Gillessen, A. Silymarin as supportive treatment in liver diseases: a narrative review / A. Gillessen, H. H. Schmidt // *Adv. Ther.* – 2020. – Vol. 37, N 4. – P. 1279–1301. <https://doi.org/10.1007/s12325-020-01251-y>
2. Javed, S. Reassessing bioavailability of silymarin / S. Javed, K. Kohli, V. Ali // *Altern. Med. Rev.* – 2011. – Vol. 16, N 3. – P. 239–249.
3. The metabolism of berberine and its contribution to the pharmacological effects / K. Wang [et al.] // *Drug Metab. Rev.* – 2017. – Vol. 49, N 2. – P. 139–157. <https://doi.org/10.1080/03602532.2017.1306544>
4. The effect of berberine administration to rats on the functional state of liver after common bile duct ligation / I. V. Zverinsky [et al.] // *Biochemistry (Moscow) Supplement Series B: Biomedical Chemistry.* – 2012. – Vol. 6, N 2. – P. 159–163. <https://doi.org/10.1134/s1990750812020163>
5. Влияние берберина на восстановление активности ферментов биотрансформации ксенобиотиков печени крыс после частичной гепатэктомии / И. В. Зверинский [и др.] // *Биомед. химия.* – 2015. – Т. 61, № 3. – С. 381–383. <https://doi.org/10.18097/pbmc20156103381>
6. Research progress on berberine with a special focus on its oral bioavailability / C. S. Liu [et al.] // *Fitoterapia.* – 2016. – Vol. 109. – P. 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2016.02.001>
7. Zhou, S. Herbal modulation of P-glycoprotein / S. Zhou, L. Y. Lim, B. Chowbay // *Drug Metab. Rev.* – 2004. – Vol. 36, N 1. – P. 57–104. <https://doi.org/10.1081/dmr-120028427>
8. Dokania, S. Self-microemulsifying drug delivery system (SMEDDS) – challenges and road ahead / S. Dokania, A. K. Joshi // *Drug Deliv.* – 2015. – Vol. 22, N 6. – P. 675–690. <https://doi.org/10.3109/10717544.2014.896058>

9. Вергун, О. М. Острые отравления парацетамолом, диагностика / О. М. Вергун, С. Н. Борисевич, В. С. Камышников // *Лабораторная диагностика. Восточная Европа*. – 2015. – № 2 (14). – С. 113–118.
10. Bhushan, B. Liver regeneration after acetaminophen hepatotoxicity: mechanisms and therapeutic opportunities / B. Bhushan, U. Apte // *Am. J. Pathol.* – 2019. – Vol. 189, N 4. – P. 719–729. <https://doi.org/10.1016/j.ajpath.2018.12.006>
11. Современные проблемы биохимии. Методы исследований / Е. В. Барковский [и др.]; под ред. проф. А. А. Чиркина. – Минск, 2013. – С. 158–192.
12. Tamura, T. A new selenoprotein from human lung adenocarcinoma cells: purification, properties, and thioredoxin reductase activity / T. Tamura, T. C. Stadtman // *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* – 1996. – Vol. 93, N 3. – P. 1006–1011. <https://doi.org/10.1073/pnas.93.3.1006>
13. Balamir, A. NADP-linked isocitrate dehydrogenase from beef liver: a new method of purification and the effect of metal ion cofactor on its stability / A. Balamir // *Biochem. Med.* – 1983. – Vol. 29, N 2. – P. 194–206. [https://doi.org/10.1016/0006-2944\(83\)90040-6](https://doi.org/10.1016/0006-2944(83)90040-6)
14. Acetaminophen from liver to brain: New insights into drug pharmacological action and toxicity // C. I. Ghanem [et al.] // *Pharmacol. Res.* – 2016. – Vol. 109. – P. 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2016.02.020>
15. Экспериментальная оценка эффективности совместного применения берберина и силимарина в составе самоэмульгирующей системы доставки с целью повышения их гепатопротекторной активности при токсическом гепатите / И. П. Сутько [и др.] // *Вестн. Смоленской гос. мед. акад.* – 2019. – Т. 18, № 3. – С. 31–39.

## References

1. Gillessen A., Schmidt H. H. Silymarin as supportive treatment in liver diseases: a narrative review. *Advances in Therapy*, 2020, vol. 37, no. 4, pp. 1279–1301. <https://doi.org/10.1007/s12325-020-01251-y>
2. Javed S., Kohli K., Ali V. Reassessing bioavailability of silymarin. *Alternative Medicine Review*, 2011, vol. 16, no. 3, pp. 239–249.
3. Wang K., Feng X., Chai L., Cao S., Qiu F. The metabolism of berberine and its contribution to the pharmacological effects. *Drug Metabolism Reviews*, 2017, vol. 49, no. 2, pp. 139–157. <https://doi.org/10.1080/03602532.2017.1306544>
4. Zverinsky I. V., Melnichenko N. G., Poplavsky V. A., Sutsko I. P., Telegin P. G., Shlyahun A. G. The effect of berberine administration to rats on the functional state of liver after common bile duct ligation. *Biochemistry (Moscow) Supplement Series B: Biomedical Chemistry*, 2012, vol. 6, no. 2, pp. 159–163. <https://doi.org/10.1134/s1990750812020163>
5. Zverinsky I. V., Zverinskaya H. G., Sutsko I. P., Telegin P. G., Shlyahun A. G. Effects of berberine on the recovery of rat liver xenobiotic-metabolizing enzymes after partial hepatectomy. *Biomeditsinskaya khimiya = Biomedical Chemistry*, 2015, vol. 61, no. 3, pp. 381–383 (in Russian). <https://doi.org/10.18097/pbmc20156103381>
6. Liu C.-S., Zheng Y.-R., Zhang Y.-F., Long X.-Y. Research progress on berberine with a special focus on its oral bioavailability. *Fitoterapia*, 2016, vol. 109, pp. 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2016.02.001>
7. Zhou S., Lim L. Y., Chowbay B. Herbal modulation of P-glycoprotein. *Drug Metabolism Reviews*, 2004, vol. 36, no. 1, pp. 57–104. <https://doi.org/10.1081/dmr-120028427>
8. Dokania S., Joshi A. K. Self-microemulsifying drug delivery system (SMEDDS) – challenges and road ahead. *Drug Delivery*, 2015, vol. 22, no. 6, pp. 675–690. <https://doi.org/10.3109/10717544.2014.896058>
9. Vergun O., Borisevich S., Kamyschnikov V. Acute paracetamol intoxication, diagnostics. *Laboratornaya diagnostika. Vostochnaya Evropa = Laboratory diagnostics. Eastern Europe*, 2015, no. 2 (14), pp. 113–118 (in Russian).
10. Bhushan B., Apte U. Liver regeneration after acetaminophen hepatotoxicity: mechanisms and therapeutic opportunities. *American Journal of Pathology*, 2019, vol. 189, no. 4, pp. 719–729. <https://doi.org/10.1016/j.ajpath.2018.12.006>
11. Barkovskii E. V., Bokut' S. B., Borodinskii A. N., Buko V. U., Valentyukevich O. I., Gritsuk A. I. [et al.]. *Modern problems of biochemistry. Research methods*. Minsk, 2013, pp. 158–192 (in Russian).
12. Tamura T., Stadtman T. C. A new selenoprotein from human lung adenocarcinoma cells: purification, properties and thioredoxin activity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1996, vol. 93, no. 3, pp. 1006–1011. <https://doi.org/10.1073/pnas.93.3.1006>
13. Balamir A. NADP-linked isocitrate dehydrogenase from beef liver: a new method of purification and the effect of metal ion cofactor on its stability. *Biochemical Medicine*, 1983, vol. 29, no. 2, pp. 194–206. [https://doi.org/10.1016/0006-2944\(83\)90040-6](https://doi.org/10.1016/0006-2944(83)90040-6)
14. Ghanem C. I., Pérez M. J., Manautou J. E., Mottino A. D. Acetaminophen from liver to brain: New insights into drug pharmacological action and toxicity. *Pharmacological Research*, 2016, vol. 109, pp. 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2016.02.020>
15. Sut'ko I. P., Shlyahun A. G., Titko O. V., Yankevich N. V., Kolodko A. V., Telegin P. G., Zverinsky I. V. Experimental evaluation of berberine and silymarin efficiencies in the self-emulsifying drug delivery system for enhancing their hepatoprotective activities under toxic hepatitis. *Vestnik Smolenskoj gosudarstvennoj medicinskoj akademii = Vestnik of the Smolensk State Medical Academy*, 2019, vol. 18, no. 6, pp. 31–39 (in Russian).

**Информация об авторах**

*Сутько Ирина Петровна* – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (б-р Ленинского комсомола, 50, 230030, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: irina\_sutsko@list.ru.

*Шляхтун Алексей Генрихович* – заведующий лабораторией. Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (б-р Ленинского комсомола, 50, 230030, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: a.shlyhtun@gmail.com.

*Титко Оксана Викторовна* – мл. науч. сотрудник. Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (б-р Ленинского комсомола, 50, 230030, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: o.titko@mail.ru.

*Янкевич Надежда Викторовна* – науч. сотрудник. Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (б-р Ленинского комсомола, 50, 230030, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: aurika@tut.by.

*Колодко Анастасия Васильевна* – мл. науч. сотрудник. Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (б-р Ленинского комсомола, 50, 230030, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: askamatyulkoz@mail.ru.

*Телегин Павел Геннадьевич* – мл. науч. сотрудник. Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (б-р Ленинского комсомола, 50, 230030, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: p.telegin@tut.by.

*Зверинский Игорь Владимирович* – канд. биол. наук, заведующий отделом. Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (б-р Ленинского комсомола, 50, 230030, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: zverinsky@tut.by.

*Семененя Игорь Николаевич* – д-р мед. наук, профессор, директор. Институт биохимии биологически активных соединений НАН Беларуси (б-р Ленинского комсомола, 50, 230030, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: insemenenya@yandex.by.

**Information about the authors**

*Sutsko Iryna P.* – Ph. D. (Biology), Senior researcher. Institute of Biochemistry of Biologically Active Compounds of the National Academy of Sciences of Belarus (50, Lenin Komsomol Boulevard, 230030, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: irina\_sutsko@list.ru.

*Shlyhtun Alexej G.* – Researcher, Head of the Laboratory. Institute of Biochemistry of Biologically Active Compounds of the National Academy of Sciences of Belarus (50, Lenin Komsomol Boulevard, 230030, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: a.shlyhtun@gmail.com.

*Titko Aksana V.* – Junior researcher. Institute of Biochemistry of Biologically Active Compounds of the National Academy of Sciences of Belarus (50, Lenin Komsomol Boulevard, 230030, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: o.titko@mail.ru.

*Yankevich Nadezhda V.* – Researcher. Institute of Biochemistry of Biologically Active Compounds of the National Academy of Sciences of Belarus (50, Lenin Komsomol Boulevard, 230030, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: aurika@tut.by.

*Kolodko Anastasia V.* – Junior researcher. Institute of Biochemistry of Biologically Active Compounds of the National Academy of Sciences of Belarus (50, Lenin Komsomol Boulevard, 230030, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: askamatyulkoz@mail.ru.

*Telegin Pavel G.* – Junior researcher. Institute of Biochemistry of Biologically Active Compounds of the National Academy of Sciences of Belarus (50, Lenin Komsomol Boulevard, 230030, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: p.telegin@tut.by.

*Zverinsky Igor V.* – Ph. D. (Biology), Head of the Department. Institute of Biochemistry of Biologically Active Compounds of the National Academy of Sciences of Belarus (50, Lenin Komsomol Boulevard, 230030, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: zverinsky@tut.by.

*Semenenya Igor N.* – D. Sc. (Medicine), Professor, Director. Institute of Biochemistry of Biologically Active Compounds of the National Academy of Sciences of Belarus (50, Lenin Komsomol Boulevard, 230030, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: insemenenya@yandex.by.

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

УДК 616.72-002.77:577.161.2  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-723-729>

Поступило в редакцию 17.11.2020  
Received 17.11.2020

Е. В. Руденко<sup>1</sup>, Т. Д. Тябут<sup>1</sup>, А. Е. Буглова<sup>1</sup>, Г. А. Бабак<sup>2</sup>, П. М. Морозик<sup>3</sup>, Т. Д. Борисенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусская медицинская академия последипломного образования, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Первая городская клиническая больница, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

## ЧАСТОТА ВСТРЕЧАЕМОСТИ ГИПОВИТАМИНОЗА D И АССОЦИИИ ПЛАЗМЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ 25(OH)D С ПОКАЗАТЕЛЯМИ АКТИВНОСТИ ЗАБОЛЕВАНИЯ У ПАЦИЕНТОВ С РЕВМАТОИДНЫМ АРТРИТОМ

(Представлено членом-корреспондентом Н. С. Сердюченко)

**Аннотация.** Гиповитаминоз D – важный экологический фактор риска, влияющий на распространенность и тяжесть некоторых аутоиммунных заболеваний, включая ревматоидный артрит (РА). Цель настоящего исследования – выявить частоту встречаемости дефицита и недостаточности витамина D у пациентов с РА, установить ассоциации плазменной концентрации 25(OH)D с показателями активности заболевания. В исследование включены 156 пациентов с РА, средний возраст  $60,2 \pm 13,9$  лет. Пациентам проводилась оценка клинической картины заболевания, выполнялось определение уровня ревматоидного фактора (РФ), С-реактивного белка (СРБ), содержание общего витамина D (25(OH)D), антител к циклическому цитруллинированному пептиду (АЦЦП). Активности РА оценивались с применением расчетных индексов DAS28 (Disease Activity Score), SDAI (Simplified Disease Activity Index) и CDAI (Clinical Disease Activity Index). Средние уровни 25(OH)D в обследованной выборке составили  $25,2 \pm 13,2$  нг/мл. Нормальные показатели витамина D, его недостаточность и дефицит наблюдались у 47 (30,3 %), 45 (28,7 %) и 64 (40,7 %) пациентов соответственно. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о высокой распространенности гиповитаминоза D у пациентов с РА. Низкий уровень 25(OH)D у пациентов с РА ассоциируется с более высокими показателями активности заболевания по индексам DAS28, SDAI и CDAI и большим количеством болезненных суставов. Назначение витамина D целесообразно использовать в качестве дополнительной терапии у пациентов с активным РА с потенциальной иммуномодулирующей целью, а также для профилактики и лечения нарушений костного метаболизма.

**Ключевые слова:** ревматоидный артрит, активность, витамин D

**Для цитирования.** Частота встречаемости гиповитаминоза D и ассоциации плазменной концентрации 25(OH)D с показателями активности заболевания у пациентов с ревматоидным артритом / Е. В. Руденко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 723–729. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-723-729>

Alena V. Rudenka<sup>1</sup>, Tamara D. Tyabut<sup>1</sup>, Anna E. Buglova<sup>1</sup>, Galina A. Babak<sup>2</sup>,  
Pavel M. Morozik<sup>3</sup>, Tatiana D. Borisenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>First City Clinical Hospital, Minsk, Republic of Belarus

<sup>3</sup>Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

## RATE OF HYPOVITAMINOSIS D AND ASSOCIATION OF PLASMA CONCENTRATION OF 25(OH)D WITH INDICATORS OF DISEASE ACTIVITY IN PATIENTS WITH RHEUMATOID ARTHRITIS

(Communicated by Corresponding Member Nikolay S. Serduychenko)

**Abstract.** Vitamin D deficiency is an important environmental risk factor that influences the prevalence and severity of several autoimmune diseases, including rheumatoid arthritis (RA). The aim of this study was to determine the incidence of vitamin D insufficiency and deficiency in patients with RA, to establish the relationship between serum vitamin D levels and indicators of disease activity. 156 patients with RA were included in the study, mean age  $60.2 \pm 13.9$  years. Assessment of clinical status was performed, serum concentrations of rheumatoid factor (RF), C-reactive protein (CRP), total vitamin D (25(OH)D), antibodies to cyclic citrullinated peptide (ACCP) were determined. RA disease activity was evaluated using DAS28 (disease activity score), SDAI (Simplified Disease Activity Index) and CDAI (Clinical Disease Activity Index) scores. Average levels of 25(OH)D in the surveyed sample were  $25.2 \pm 13.2$  ng/ml. The results of the study indicate a high prevalence of vitamin D deficiency in patients with RA. Normal indicators of vitamin D, its insufficiency and deficiency were observed in 47 (30.3 %), 45 (28.7 %) and 64 (40.7 %) patients, respectively. Low level of serum 25(OH)D was associated with higher indi-

ces of RA activity according to DAS28, SDAI and CDAI, as well as with greater tender joint count. Vitamin D should be prescribed as an adjunctive therapy in patients with active RA due to its potential immunomodulatory effect, as well as for the prevention and treatment of bone metabolism disorders.

**Keywords:** rheumatoid arthritis, disease activity, vitamin D

**For citation:** Rudenka A. V., Tyabut T. D., Buglova A. E., Babak G. A., Morozik P. M., Borisenko T. D. Rate of hypovitaminosis D and association of plasma concentration of 25(OH)D with indicators of disease activity in patients with rheumatoid arthritis. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 723–729 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-723-729>

**Введение.** Дефицит и недостаточность витамина D широко распространены в популяциях и часто наблюдаются у пациентов с патологией костно-мышечной системы и аутоиммунными заболеваниями [1]. Изучена роль кальцитриола в регуляции кальций-фосфорного обмена и костного метаболизма, которую он осуществляет при взаимодействии с паратиреоидным гормоном (ПТГ) и кальцитонином. Вместе с тем в связи с открытием VDR интерес к изучению витамина D вновь увеличился, и стало очевидным, что эффекты  $1,25(\text{OH})_2\text{D}$  не ограничиваются только поддержанием гомеостаза кальция и фосфора. Полученные в течение последних лет экспериментальные и клинические данные свидетельствуют о том, что дефицит витамина D может быть важным экологическим фактором риска, влияющим на распространенность и тяжесть некоторых аутоиммунных заболеваний, включая ревматоидный артрит (РА), особенно у лиц, проживающих в определенных географических и климатических условиях [2; 3]. Вместе с тем результаты проведенных на сегодняшний день исследований об ассоциации 25(OH)D с тяжестью РА и влиянии приема препаратов витамина D на течение РА противоречивы и не позволяют сделать однозначные выводы.

Цель настоящего исследования – выявить частоту встречаемости дефицита и недостаточности витамина D у пациентов с РА, установить ассоциации плазменной концентрации 25(OH)D с показателями активности заболевания.

**Материалы и методы исследования.** Набор пациентов с РА производился на базе Минского городского центра остеопороза и заболеваний костно-мышечной системы и отделения ревматологии 1-й городской клинической больницы г. Минска с января 2019 г. по август 2020 г. В исследование были включены пациенты в возрасте старше 18 лет с установленным диагнозом РА в соответствии с диагностическими критериями Американской коллегии ревматологов и Европейской лиги по борьбе с ревматическими заболеваниями 2010 года (ACR/EULAR, 2010) [4]. Перед включением в исследование все пациенты подписали письменное информированное согласие на участие в исследовании. Клиническое обследование пациентов включало сбор анамнеза заболевания, измерение длины тела и массы тела, расчет индекса массы тела (ИМТ) по стандартной методике, оценку клинической картины заболевания, заполнение карт пациентов с подсчетом числа припухших (ЧПС) и болезненных (ЧБС) суставов, общей оценки активности заболевания больным (ООЗБ), общей оценки активности заболевания врачом (ООАВ), оценки боли пациентом по 100-миллиметровой горизонтальной визуально-аналоговой шкале (ВАШ).

Забор крови для выполнения биохимического и электрохемилюминисцентного анализов крови выполнялся из кубитальной вены утром, натощак, не ранее чем через 10–12 часов после последнего приема пищи, в стерильную вакуумную пробирку в объеме 5 мл без добавления консервантов и антикоагулянтов. Выполнялось определение уровня ревматоидного фактора (РФ), С-реактивного белка (СРБ), содержание общего витамина D (25(OH)D), антител к циклическому цитруллинированному пептиду (АЦЦП) методом электрохемилюминисцентного иммунотеста ECLIA на иммунохимическом анализаторе cobase с использованием оригинальных реагентов Roche Diagnostics GmbH, Германия. В соответствии с международными рекомендациями [5] уровень витамина D считался соответствующим норме при значениях 25(OH)D > 30 нг/мл, показатели 20–29 нг/мл определялись как недостаточность, менее 20 нг/мл – дефицит, менее 10 нг/мл – выраженный дефицит витамина D.

С целью оценки активности заболевания применялись расчетные индексы DAS28 (Disease Activity Score) для 28 суставов в модификации с применением СРБ, упрощенный индекс активности болезни SDAI (Simplified Disease Activity Index) и клинический индекс активности болезни

CDAI (Clinical Disease Activity Index). Вычисление вышеперечисленных индексов основывается на следующих основных клинико-лабораторных показателях: ЧПС и ЧБС из 28 суставов (лучезапястные, пястно-фаланговые, проксимальные межфаланговые кистей, плечевые, локтевые, коленные суставы), ООЗБ и ООАВ по ВАШ, количественное определение СРБ в сыворотке крови. Индексы активности РА рассчитывались по стандартным формулам с использованием онлайн калькулятора (<https://www.msmanuals.com/ru>). Критерии оценки активности болезни с помощью расчетных индексов представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Критерии оценки активности РА в соответствии с расчетными индексами

Table 1. Criteria of RA activity according to composite indices

Степень активности Activity level	Индекс Index		
	DAS28	SDAI	CDAI
Ремиссия (0)	<2,6	≤3,3	<2,8
Низкая активность (1)	2,6–3,2	3,3–11,0	2,8–10,0
Средняя активность (2)	3,2–5,1	11,1–26,0	10,0–22,0
Высокая активность (3)	>5,1	>26,0	>22,0

Статистический анализ полученных данных проводился с использованием программы Statistica 10 для Windows. Статистическая значимость различий выборок оценивалась методом параметрической статистики с использованием *t*-критерия для независимых выборок и анализа дисперсий и критерия наименьшей значимости в модуле дисперсионного анализа ANOVA. Оценку вероятности проводили с помощью точного теста Фишера. Различия считали статистически значимыми при уровне значимости  $p < 0,05$ .

**Результаты и их обсуждение.** В исследование были включены 156 пациентов с РА, средний возраст  $60,2 \pm 13,9$  лет, из них 139 женщин (средний возраст  $60,1 \pm 13,7$  лет) и 17 мужчин (средний возраст  $58,8 \pm 13,4$  лет). Средний возраст начала заболевания пациентов обследованной выборки составил  $49,7 \pm 16,4$  года ( $51,3 \pm 14,0$  лет для мужчин и  $49,0 \pm 16,2$  года для женщин). У 38 пациентов (24,4 %) отмечалось наличие системных проявлений: у 25 пациентов ревматоидные узелки, у 12 – синдром Шегрена, у 1 пациента кожный васкулит. Среди коморбидных заболеваний наиболее часто диагностировались заболевания сердечно-сосудистой системы (79 пациентов), эндокринные заболевания (51 пациент), заболевания органов желудочно-кишечного тракта (58 пациентов). Также у пациентов обследованной выборки были зарегистрированы: хронический тонзиллит – 8 случаев, заболевания легких – 8 случаев, хламидийная инфекция – 11 случаев, хронический пиелонефрит – 10 случаев, мочекаменная болезнь – 11 случаев, онкологические заболевания у 5 пациентов. 4 пациента перенесли эндопротезирование крупных суставов нижних конечностей (тазобедренных, коленных).

По результатам рентгеновской денситометрии, выполненной у 128 пациентов, снижение минеральной плотности костной ткани (МПК), соответствующее остеопорозу, было выявлено у 51 пациента (39,9 %), остеопении – у 39 пациентов (30,5 %), 38 пациентов (29,6 %) имели нормальные показатели МПК. По данным анкетирования 25 пациентов (16 %) обследованной выборки имели низкоэнергетические переломы в анамнезе.

Анализ проводимой терапии РА в обследованной выборке показал, что 132 пациента (84,6 %) получали базисные противовоспалительные препараты. Из них 108 пациентов принимали метотрексат (средняя доза  $12,4 \pm 9,2$  мг в неделю), 14 – сульфосалазин (200 мг в день), 10 – лефлунамид (средняя доза  $17,5 \pm 5,0$  мг в день), 1 – комбинированную терапию (метотрексат и сульфосалазин), 19 (12,2 %) – генно-инженерные базисные препараты. На момент включения в исследование 97 пациентов (62,1 %) принимали глюкокортикоидные гормоны в средней дозе  $6,52 \pm 3,25$  мг в сутки по метилпреднизолону, 96 пациентов (61,5 %) принимали нестероидные противовоспалительные препараты (НПВП) на постоянной основе. 61 пациент (39,1 %) принимал препараты витамина D. Средний уровень 25(OH)D у пациентов, принимавших препараты витамина D, составил  $29,1 \pm 10,7$  нг/мл, у тех, кто не принимал –  $21,4 \pm 12,5$  нг/мл ( $p = 0,002$ ). Количество паци-

ентов с нормальным уровнем витамина D, недостаточностью и дефицитом составило 26 (42,6 %), 21 (34,4 %) и 14 (23 %) среди принимавших препараты витамина D, среди тех, кто не принимал – 26 (27,3 %), 20 (21,2 %) и 49 (51,5 %) соответственно.

При оценке активности РА по DAS28 было установлено, что 36 пациентов (23,1 %) находились в ремиссии, 24 (15,4 %) имели низкую активность заболевания, 51 (32,7%) – среднюю и 45 (28,8 %) – высокую активность заболевания.

Средние уровни 25(ОН)D в обследованной выборке составили  $25,2 \pm 13,2$  нг/мл. Нормальные показатели витамина D, его недостаточность и дефицит наблюдались у 47 (30,3 %, группа I), 45 (28,7 %, группа II) и 64 (40,7 %, группа III) пациентов соответственно.

Сравнительный анализ демографических данных и показателей активности РА у пациентов с разным уровнем витамина D с применением дисперсионного анализа ANOVA представлен в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Соотношение между уровнем витамина D, демографическими показателями и характеристиками заболевания у пациентов с РА

Table 2. Relationship between vitamin D levels, demographics, and disease characteristics in patients with RA

Показатель Index	Уровень витамина D Vitamin D level			p
	Норма (группа I) Norm (group I)	Недостаточность (группа II) Failure (group II)	Дефицит (группа III) Deficiency (group III)	
Возраст, годы	65,8 ± 14,4	58,4 ± 12,9	58,9 ± 14,1	0,74
ИМТ	26,0 ± 4,3	26,5 ± 6,2	26,9 ± 5,1	0,96
Длительность заболевания, годы	11,2 ± 12,8	8,6 ± 10,3	10,8 ± 10,6	0,72
ООЗБ, ВАШ	50,4 ± 25,2	39,0 ± 27,7	51,8 ± 26,9	0,1
ООАВ, ВАШ	38,7 ± 20,8	31,5 ± 18,04	39,2 ± 15,7	0,69
Оценка боли пациентом, ВАШ	49,1 ± 26,4	37,3 ± 27,8	52,5 ± 25,4	0,16
РФ, ед/л	102,8 ± 18,0	73,6 ± 13,2	100,8 ± 12,6	0,977
ЦРБ, мг/л	21,4 ± 5,5	18,3 ± 4,6	29,5 ± 6,7	0,31
АЦЦ, ед/л	374,2 ± 81,2	99,1 ± 60,4	291,4 ± 42,0	0,459
ЧБС	9,5 ± 1,6	8,1 ± 1,3	13,6 ± 1,5	0,037
ЧПС	3,8 ± 0,9	2,7 ± 0,7	4,4 ± 0,9	0,16
DAS28	3,3 ± 0,4	3,5 ± 0,4	4,5 ± 0,2	0,006
SDAI	31,0 ± 5,6	27,3 ± 4,6	48,7 ± 6,6	0,029
CDAI	15,1 ± 2,1	14,3 ± 1,9	22,4 ± 2,1	0,009
Доза ГК, мг	6,7 ± 5,2	6,6 ± 2,6	7,4 ± 2,3	0,99

Представленные в табл. 2 данные указывают, что в обследованной выборке низкий уровень витамина D ассоциировался с более высокими показателями активности РА по индексам DAS28, SDAI и CDAI, а также с большим количеством болезненных суставов.

Пациенты с наличием сопутствующих заболеваний (группа I,  $n = 105$ ) статистически значимо отличались от пациентов, у которых не было коморбидности (группа II,  $n = 51$ ) по возрасту, возрасту начала заболевания, ООЗБ, ООАВ, индексу активности заболевания CDAI, количеству болезненных и припухших суставов (табл. 3). Статистически значимых различий в концентрации сывороточного 25(ОН)D в группах выявлено не было.

Изучению новой концепции действия витамина D как потенциального иммуномодулятора способствовало обнаружение способности некоторыми типами иммунных клеток экспрессировать VDR и продуцировать кальцитриол [6]. Так, VDR экспрессируется в нейтрофилах, моноцитах, макрофагах и дендритных клетках, а также в Т- и В-лимфоцитах. VDR модулирует функцию около 500 генов, участвующих в активации, дифференцировке и пролиферации иммунных клеток. Моноциты, макрофаги и дендритные клетки вырабатывают как 25- $\alpha$ , так и 1- $\alpha$ -гидроксилазу, что позволяет им преобразовывать сывороточный холекальциферол или эргокальциферол в 25(ОН)D и затем в 1,25(ОН)<sub>2</sub>D. Регуляция метаболизма витамина D в клетках иммунной систе-

Т а б л и ц а 3. Сравнительная характеристика пациентов с наличием коморбидных заболеваний и без

T a b l e 3. Comparative characteristics of patients with and without comorbidities

Показатель Index	Группа I Group I	Группа II Group II	p
Возраст, годы	61,8 ± 13,2	55,8 ± 15,7	0,008
Возраст начала заболевания, годы	51,4 ± 14,6	44,2 ± 17,8	0,01
ИМТ	26,9 ± 4,9	26,3 ± 5,1	0,72
Длительность заболевания, годы	10,4 ± 9,1	8,9 ± 8,3	0,74
ООЗБ, ВАШ	47,3 ± 24,1	35,6 ± 21,6	0,008
ООАВ, ВАШ	39,3 ± 20,0	30,9 ± 15,7	0,01
Оценка боли пациентом, ВАШ	47,7 ± 27,8	39,3 ± 24,8	0,08
РФ	94,3 ± 70,4	112,2 ± 83,1	0,33
АЦЦП	241,8 ± 190,9	293,1 ± 226,3	0,5
ЧБС	9,5 ± 5,5	5,6 ± 4,8	<0,001
ЧПС	4,9 ± 3,1	1,7 ± 1,3	<0,001
DAS28	4,2 ± 1,7	3,6 ± 2,1	0,1
SDAI	40,5 ± 5,8	34,8 ± 5,3	0,06
CDAI	10,3 ± 9,4	20,7 ± 14,1	<0,001
Доза ГК, мг	6,8 ± 2,6	6,5 ± 3,5	0,73
25(ОН)D, нг/мл	24,3 ± 13,2	27,0 ± 13,1	0,29

мы включает внутрикринные и паракринные пути, которые подвержены локальным модулирующим сигналам. Тканевая концентрация  $1,25(\text{OH})_2\text{D}$  и его иммуномодулирующая активность зависят от сывороточного уровня  $25(\text{OH})\text{D}$ , а также от продукции цитокинов иммунными клетками. Локально синтезированный  $1,25(\text{OH})_2\text{D}$  обладает тканеспецифическим иммуномодулирующим эффектом и способностью контролировать процессы созревания и функции иммунных клеток [7]. Связываясь с VDR на поверхности Т-клеток, кальцитриол играет важную роль в регуляции фенотипов Т-лимфоцитов, в том числе модулирует дифференцировку и активацию  $\text{CD4}^+$  лимфоцитов [8]. Витамин D подавляет пролиферацию Т-лимфоцитов, ингибируя выработку провоспалительных Th-цитокинов, включая IL-2, IL-17 и интерферон- $\gamma$ , путем связывания VDR с промоторами генов, кодирующих и синтез этих цитокинов [9], а также может стимулировать некоторые иммунные механизмы путем усиления эффекторных Т-клеточных ответов, включая цитотоксическую функцию  $\text{CD8}^+$ , экспрессию и активацию Т-клеточных рецепторов [10]. Таким образом, витамин D модулирует адаптивный иммунный ответ, сдвигая соотношение между Т-лимфоцитами в пользу Th2 и регуляторных Т-клеток, которые играют важную роль в иммунном ответе. При дефиците витамина D нарушается физиологическое соотношение Th1 и Th2 клеток в пользу Th1, что приводит к развитию хронического воспалительного процесса вследствие увеличения выработки провоспалительных цитокинов. Поскольку дисбаланс Th1/Th17 и гиперфункция клеток Th17 характерны для РА, логично предположить, что витамин D играет роль в патогенезе заболевания.

Во многих исследованиях выявлена отрицательная корреляция между активностью РА и сывороточной концентрацией  $25(\text{OH})\text{D}$  [11], при длительном систематическом наблюдении пациентов с РА гиповитаминоз D ассоциировался с активностью заболевания при раннем РА в течение первых 12 месяцев болезни [12]. В [13] была обнаружена независимая отрицательная корреляция между сывороточным  $25(\text{OH})\text{D}$  и индексом активности РА DAS28, значение которого уменьшалось пропорционально увеличению концентрации  $25(\text{OH})\text{D}$  в сыворотке крови в течение периода наблюдения. Тем не менее, результаты исследований взаимосвязи между сывороточным  $25(\text{OH})\text{D}$  и активностью РА достаточно противоречивы: в некоторых работах была выявлена отрицательная взаимосвязь уровня  $25(\text{OH})\text{D}$  и DAS28 [14], в других научных публикациях значимых корреляций между уровнем витамина D и активностью РА не продемонстрировано [15]. Противоречивость результатов вышеприведенных исследований может объясняться влиянием нескольких факторов, например, продолжительностью воздействия солнечных лучей, уровнем физической активности, тяжестью РА, приемом препаратов витамина D, распространенностью гиповитаминоза D в общей популяции.

### Выводы

1. Гиповитаминоз D часто встречается у пациентов с РА: в обследованной выборке дефицит и недостаточность витамина D наблюдались у 40,7 и 28,7 % пациентов соответственно.

2. Низкий уровень 25(OH)D у пациентов с РА ассоциируется с более высокими показателями активности заболевания по индексам DAS28, SDAI и CDAI и большим количеством ЧБС.

3. Одной из основных причин гиповитаминоза D у пациентов с РА является низкий уровень приема препаратов витамина D – 39,1 %. Назначение витамина D целесообразно использовать в качестве дополнительной терапии у пациентов с активным РА с потенциальной иммуномодулирующей целью, а также для профилактики и лечения нарушений костного метаболизма. Тем не менее, для выявления иммуномодулирующих механизмов витамина D и определения оптимальных уровней 25(OH)D при РА необходимы дальнейшие рандомизированные контролируемые исследования.

### Список использованных источников

1. Asystematic review of vitamin D status in populations worldwide / J. Hilger [et al.] // *Br. J. Nutr.* – 2014. – Vol. 111, N 1. – P. 23–45. <https://doi.org/10.1017/s0007114513001840>
2. Bellan, M. Role of Vitamin D in Rheumatoid Arthritis / M. Bellan, P. P. Sainaghi, M. Pirisi // *Adv. Exp. Med. Biol.* – 2017. – Vol. 996. – P. 155–168. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56017-5\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56017-5_13)
3. Vitamin D Deficiency and Rheumatoid Arthritis / L. L. W. Ishikawa [et al.] // *Clin. Rev. Allergy Immunol.* – 2017. – Vol. 52, N 3. – P. 373–388. <https://doi.org/10.1007/s12016-016-8577-0>
4. Rheumatoid arthritis classification criteria: An American College of Rheumatology/European League Against Rheumatism collaborative initiative / D. Aletaha [et al.] // *Arthritis & Rheumatism.* – 2010. – Vol. 62, N 9. – P. 2569–2581. <https://doi.org/10.1002/art.27584>
5. Vitamin D supplementation in elderly or postmenopausal women: a 2013 update of 2008 recommendations from the European Society for Clinical and Economic Aspects of Osteoporosis and Osteoarthritis (ESCEO) / R. Rizzoli [et al.] // *Cur. Med. Research and Opinion.* – 2013. – Vol. 29, N 4. – P. 309–313.
6. Vanherwegen, A. S. Regulation of Immune Function by Vitamin D and Its Use in Diseases of Immunity / A. S. Vanherwegen, C. Gysemans, C. Mathieu // *Endocrinol. Metab. Clin. North Am.* – 2017. – Vol. 46, N 4. – P. 1061–1094. <https://doi.org/10.1016/j.ecl.2017.07.010>
7. Peterlik, M. Dysfunction of the vitamin D endocrine system as common cause for multiple malignant and chronic diseases / M. Peterlik, H. S. Cross // *Anticancer Res.* – 2006. – Vol. 26. – P. 2581–2588.
8. Lineage-specific effects of 1,25-dihydroxyvitamin D(3) on the development of effector CD4 T cells / M. T. Palmer [et al.] // *J. Biol. Chem.* – 2011. – Vol. 286, N 2. – P. 997–1004. <https://doi.org/10.1074/jbc.m110.163790>
9. Interleukin-2 is one of the targets of 1,25-dihydroxyvitamin D3 in the immune system / C. J. Bemiss [et al.] // *Arch. Biochem. Biophys.* – 2002. – Vol. 402, N 2. – P. 249–254. [https://doi.org/10.1016/s0003-9861\(02\)00082-6](https://doi.org/10.1016/s0003-9861(02)00082-6)
10. Vitamin D controls T cell antigen receptor signaling and activation of human T cells / M. R. von Essen [et al.] // *Nat. Immunol.* – 2010. – Vol. 11, N 4. – P. 344–349. <https://doi.org/10.1038/ni.1851>
11. Vitamin D and rheumatoid arthritis: an ongoing mystery / N. L. Bragazzi [et al.] // *Curr. Opin. Rheumatol.* – 2017. – Vol. 29, N 4. – P. 378–388. <https://doi.org/10.1097/bor.0000000000000397>
12. Hypovitaminosis D in recent onset rheumatoid arthritis is predictive of reduced response to treatment and increased disease activity: a 12 month follow-up study / M. Di Franco [et al.] // *BMC Musculoskelet. Disord.* – 2015. – Vol. 16, N 1. – P. 53. <https://doi.org/10.1186/s12891-015-0505-6>
13. Association between serum vitamin D metabolite levels and disease activity in patients with early inflammatory polyarthritis / S. Patel [et al.] // *Arthritis Rheum.* – 2007. – Vol. 56, N 7. – P. 2143–2149. <https://doi.org/10.1002/art.22722>
14. Lee, Y. H. Vitamin D level in rheumatoid arthritis and its correlation with the disease activity: a meta-analysis / Y. H. Lee, S. C. Bae // *Clin. Exp. Rheumatol.* – 2016. – Vol. 34, N 5. – P. 827–833.
15. Relationships between serum 25-hydroxycalciferol, vitamin D in-take and disease activity in patients with rheumatoid arthritis – tomorrow study / Y. Matsumoto [et al.] // *Mod. Rheumatol.* – 2015. – Vol. 25, N 2. – P. 246–250. <https://doi.org/10.3109/14397595.2014.952487>

### References

1. Hilger J., Friedel A., Herr R., Rausch T., Roos F., Wahl D. A., Pierroz D. D., Weber P., Hoffmann K. A systematic review of vitamin D status in populations worldwide. *British Journal of Nutrition*, 2014, vol. 111, no. 1, pp. 23–45. <https://doi.org/10.1017/s0007114513001840>
2. Bellan M., Sainaghi P. P., Pirisi M. Role of Vitamin D in Rheumatoid Arthritis. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 2017, vol. 996, pp. 155–168. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56017-5\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56017-5_13)
3. Ishikawa L. L. W., Colavite P. M., de Campos Fraga-Silva T. F., Mimura L. A. N., França T. G. D., Zorzella-Pezavento S. F. G., Chiuso-Minicucci F., Marcolino L. D., Penitenti M., Ikoma M. R. V., Sartori A. Vitamin D Deficiency and Rheumatoid Arthritis.

*Clinical Reviews in Allergy and Immunology*, 2017, vol. 52, no. 3, pp. 373–388. <https://doi.org/10.1007/s12016-016-8577-0>

4. Aletaha D., Neogi T., Silman A. J., Funovits J., Felson D. T., Bingham C. O., Birnbaum N. S., Burmester G. R., Bykerk V. P., Cohen M. D., Combe B., Costenbader K. H., Dougados M., Emery P., Ferraccioli G., Hazes J. M. W., Hobbs K., Huizinga T. W. J., Kavanaugh A., Kay J., Kvien T. K., Laing T., Mease P., Ménard H. A., Moreland L. W., Naden R. L., Pincus T., Smolen J. S., Stanislawski-Biernat E., Symmons D., Tak P. P., Upchurch K. S., Vencovsky J., Wolfe F., Hawker G. Rheumatoid arthritis classification criteria: An American College of Rheumatology/European League Against Rheumatism collaborative initiative. *Arthritis & Rheumatism*, 2010, vol. 62, no. 9, pp. 2569–2581. <https://doi.org/10.1002/art.27584>

5. Rizzoli R., Boonen S., Brandi M.-L., Bruyère O., Cooper C., Kanis J. A., Kaufman J.-M., Ringe J. D., Weryha G., Reingster J.-Y. Vitamin D supplementation in elderly or postmenopausal women: a 2013 update of 2008 recommendations from the European Society for Clinical and Economic Aspects of Osteoporosis and Osteoarthritis (ESCEO). *Current Medical Research and Opinion*, 2013, vol. 29, no. 4, pp. 305–313. <https://doi.org/10.1185/03007995.2013.766162>

6. Vanherwegen A. S., Gysemans C., Mathieu C. Regulation of Immune Function by Vitamin D and Its Use in Diseases of Immunity. *Endocrinology and Metabolism Clinics of North America*, 2017, vol. 46, no. 4, pp. 1061–1094. <https://doi.org/10.1016/j.ecl.2017.07.010>

7. Peterlik M., Cross H. S. Dysfunction of the vitamin D endocrine system as common cause for multiple malignant and chronic diseases. *Anticancer Research*, 2006, vol. 26, pp. 2581–2588.

8. Palmer M. T., Lee Y. K., Maynard C. L., Oliver J. R., Bikle D. D., Jetten A. M., Weaver C. T. Lineage-specific effects of 1,25-dihydroxyvitamin D(3) on the development of effector CD4 T cells. *Journal of Biological Chemistry*, 2011, vol. 286, no. 2, pp. 997–1004. <https://doi.org/10.1074/jbc.m110.163790>

9. Bemiss C. J., Mahon B. D., Henry A., Weaver V., Cantorna M. T. Interleukin-2 is one of the targets of 1,25-dihydroxyvitamin D3 in the immune system. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2002, vol. 402, no. 2, pp. 249–254. [https://doi.org/10.1016/s0003-9861\(02\)00082-6](https://doi.org/10.1016/s0003-9861(02)00082-6)

10. von Essen M. R., Kongsbak M., Schjerling P., Olgaard K., Ødum N., Geisler C. Vitamin D controls T cell antigen receptor signaling and activation of human T cells. *Nature Immunology*, 2010, vol. 11, no. 4, pp. 344–349. <https://doi.org/10.1038/ni.1851>

11. Bragazzi N. L., Watad A., Neumann S. G., Simon M., Brown S. B., Much A. A., Harari A., Tiosano S., Amital H., Shoenfeld Y. Vitamin D and rheumatoid arthritis: an ongoing mystery. *Current Opinion Rheumatology*, 2017, vol. 29, no. 4, pp. 378–388. <https://doi.org/10.1097/bor.0000000000000397>

12. Di Franco M., Barchetta I., Iannuccelli C., Gerardi M. C., Frisenda S., Ceccarelli F., Valesini G., Cavallo M. G. Hypovitaminosis D in recent onset rheumatoid arthritis is predictive of reduced response to treatment and increased disease activity: a 12 month follow-up study. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2015, vol. 16, no. 1, pp. 53. <https://doi.org/10.1186/s12891-015-0505-6>

13. Patel S., Farragher T., Berry J., Bunn D., Silman A., Symmons D. Association between serum vitamin D metabolite levels and disease activity in patients with early inflammatory polyarthritis. *Arthritis and Rheumatism*, 2007, vol. 56, no. 7, pp. 2143–2149. <https://doi.org/10.1002/art.22722>

14. Lee Y. H., Bae S. C. Vitamin D level in rheumatoid arthritis and its correlation with the disease activity: a meta-analysis. *Clinical and Experimental Rheumatology*, 2016, vol. 34, no. 5, pp. 827–833.

15. Matsumoto Y., Sugioka Y., Tada M., Okano T., Mamoto K., Inui K., Habu D., Koike T. Relationships between serum 25-hydroxycalciferol, vitamin D intake and disease activity in patients with rheumatoid arthritis – tomorrow study. *Modern Rheumatology*, 2015, vol. 25, no. 2, pp. 246–250. <https://doi.org/10.3109/14397595.2014.952487>

### Информация об авторах

*Руденко Елена Викторовна* – канд. мед. наук, доцент. Белорусская медицинская академия последипломного образования (ул. П. Бровки, 3, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alenka.v.ru@gmail.com.

*Тябут Тамара Дмитриевна* – д-р мед. наук, профессор. Белорусская медицинская академия последипломного образования (ул. П. Бровки, 3, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tamara\_dt@mail.ru.

*Буглова Анна Евгеньевна* – канд. мед. наук, доцент. Белорусская медицинская академия последипломного образования (ул. П. Бровки, 3, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: anna\_buglova@mail.ru.

*Бабак Галина Алексеевна* – канд. мед. наук, заведующий отделением. Первая городская клиническая больница (пр. Независимости, 64, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: babakgalina@mail.ru.

*Морозик Павел Михайлович* – канд. биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: P.Marozik@igc.by.

*Борисенко Татьяна Дмитриевна* – канд. мед. наук, доцент, заведующий лабораторией. Первая городская клиническая больница (пр. Независимости, 64, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tatyanaadm77@mail.ru.

### Information about the authors

*Rudenko Alena V.* – Ph. D. (Medicine), Associate professor. Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education (3, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alenka.v.ru@gmail.com.

*Tyabut Tamara D.* – D. Sc. (Medicine), Professor. Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education (3, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tamara\_dt@mail.ru.

*Buglova Anna E.* – Ph. D. (Medicine), Associate professor. Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education (3, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: anna\_buglova@mail.ru.

*Babak Galina A.* – Ph. D. (Medicine), Head of the Department. First City Clinical Hospital (64, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: babakgalina@mail.ru.

*Morozik Pavel M.* – Ph. D. (Biology), Associate professor, Head of the Laboratory. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: P.Marozik@igc.by.

*Borisenko Tatiana D.* – Ph. D. (Medicine), Head of the Laboratory. First City Clinical Hospital (64, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tatyanaadm77@mail.ru.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ****TECHNICAL SCIENCES**

УДК 666.65:549.632

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-730-738>

Поступило в редакцию 13.08.2020

Received 13.08.2020

**Член-корреспондент А. Ф. Ильющенко, Л. Н. Дьячкова, В. А. Осипов***Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Республика Беларусь***СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ  
ИЗ РЕАКЦИОННОСПЕЧЕННОЙ КАРБИДОКРЕМНИЕВОЙ КЕРАМИКИ**

**Аннотация.** Представлены результаты исследования процесса получения сложнопрофильных элементов подложки зеркал оптических телескопов из реакционноспеченной карбидокремниевой керамики. Показано, что прочность карбидокремниевой керамики зависит от дисперсности порошка карбида кремния и от температуры реакционного спекания. Повышение температуры спекания с 1500 до 1650 °С приводит к увеличению прочности на 60 МПа, а до 1800 °С – к снижению прочности на 40 МПа. Повышение прочности объясняется снижением свободного кремния и увеличением содержания вторичного карбида кремния, снижение прочности – ростом размера карбидных зерен. Исследование влияния режимов пайки шестигранных элементов для получения сложнопрофильного элемента подложки зеркала оптического телескопа на прочность паяного шва показало, что положительное влияние на прочность паяного шва оказывает введение в состав припоя на основе карбида кремния порошка карбида кремния дисперсностью 7 мкм и бора аморфного в количестве 6 %. Проведенные испытания паяных образцов при трехточечном изгибе выявили, что разрушение происходит по телу спаиваемых образцов, а не паяному шву. Структура паяного шва зависит от состава припоя и зазора между паяемыми образцами.

**Ключевые слова:** карбидокремниевая керамика, реакционное спекание, структура, свойства, пайка, сложнопрофильные элементы

**Для цитирования.** Ильющенко, А. Ф. Сложнопрофильные элементы аэрокосмической техники из реакционноспеченной карбидокремниевой керамики / А. Ф. Ильющенко, Л. Н. Дьячкова, В. А. Осипов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 730–738. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-730-738>

**Corresponding Member Alexandr Ph. Ilyushchanka, Larisa N. Dyachkova, Vladimir A. Osipov***O. V. Roman Powder Metallurgy Institute, Minsk, Republic of Belarus***COMPLEX ELEMENTS OF AEROSPACE EQUIPMENT  
FROM REACTION SILICON CARBIDE CERAMICS**

**Abstract.** The results of studying the process of obtaining complex-profile elements of the substrate of mirrors of optical telescopes from reaction-sintered silicon carbide ceramics are presented. It is shown that the strength of silicon carbide ceramics depends on the dispersion of the silicon carbide powder and on the temperature of reaction sintering. An increase in the sintering temperature from 1500 to 1650 °C leads to an increase in strength by 60 MPa, and to 1800 °C – to a decrease in strength by 40 MPa. An increase in strength is explained by a decrease in free silicon and an increase in the content of secondary silicon carbide, a decrease in strength is explained by an increase in the size of carbide grains. The study of the influence of the modes of soldering of hexagonal elements to obtain a complex-profile element of the substrate of the mirror of an optical telescope on the strength of the soldered seam showed that the introduction of silicon carbide powder 7 μm in size and amorphous boron in an amount of 6 % into the solder composition based on silicon carbide has a positive effect on the strength of the soldered seam. Tests of the brazed specimens at three-point bending showed that fracture occurs along the body of the specimens being brazed, and not the brazed seam. The structure of the brazed joint depends on the composition of the braze alloy and the gap between the samples to be brazed.

**Keywords:** silicon carbide ceramics, reaction sintering, structure, properties, brazing, complex-profile elements

**For citation:** Ilyushchanka A. Ph., Dyachkova L. N., Osipov V. A. Complex elements of aerospace equipment from reaction silicon carbide ceramics. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 730–738 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-730-738>

**Введение.** Аэрокосмическая промышленность сегодня требует применения современных технологий для создания материалов, способных работать в условиях высоких силовых, тепловых нагрузок, радиации, и которые можно применять при производстве самолетов и космических кораблей. Материалы эти должны обладать такими показателями качества конструкционных материалов, как жесткость, прочность, износостойкость, теплостойкость, коррозионная и радиационная стойкость, снижение веса и технологичность. Металлы и сплавы этим повышенным и часто противоречивым требованиям не всегда могут удовлетворять. Поэтому создаются новые виды конструкционных материалов на неметаллической основе. К таким материалам относятся бескислородная керамика и полимеры нового поколения [1; 2]. Однако применение полимеров ограничено их низкой термостойкостью. Бескислородная керамика (бориды, карбиды, нитриды, силициды переходных металлов), благодаря ковалентному строению, имеет высокую твердость, жаропрочность, коррозионную стойкость, теплопроводность, износостойкость [3]. Это делает их перспективными для применения как в аэрокосмической, так и в гражданской технике для конструкционных деталей, деталей двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей, для режущего инструмента, подшипников. Значительная прочность химической связи позволяет использовать подобные материалы в качестве легкой брони, поскольку при очень быстром механическом взаимодействии пули с броней большая часть кинетической энергии тратится на разрыв химических связей броневое материала. Сочетание высоких диэлектрических свойств с хорошей теплопроводностью дает возможность успешно применять некоторые соединения в электронной технике.

На долю керамики, главным образом, на основе SiC, в настоящее время приходится около 20 % мирового производства конструкционных материалов, и их роль в дальнейшем будет возрастать [4]. Карбид кремния является одним из самых перспективных материалов для изготовления крупногабаритных облегченных зеркальных элементов в различных оптических системах, в т. ч. астрономических телескопах, системах передачи энергии с использованием лазерного излучения [5].

Крупным производителем телескопов с использованием карбидокремниевых материалов является вторая по величине оборонно-космическая компания в мире Airbus Defence and Space. Для миссий Европейского космического агентства ею создан ряд космических телескопов, из карбида кремния изготовлено зеркало диаметром 3,5 м для космического аппарата SPICA (Space Infra-Red Telescope for Cosmology and Astrophysics) JAXA/NASA/ESA. В СНГ разработка технологии изготовления зеркал проводится специалистами ОАО «ЛЗОС», АО «ГОИ им. Вавилова» и др. В ОАО «ЛЗОС» было изготовлено несколько макетных образцов зеркал на основе карбида кремния, в АО «ГОИ им. Вавилова» – несколько серий облегченных монолитных корпусов зеркал из карбида кремния различных типоразмеров до 1200 мм в диаметре со степенью облегчения до 80 % [6]. В [7] приводятся данные по конструкции зеркала из карбида кремния диаметром 1230 мм типа «сэндвич» (ОАО «ЛОМО», г. Санкт-Петербург), коэффициент облегчения 0,74.

Получение заготовок облегченных зеркал из карбида кремния является сложным технологическим процессом. В большинстве своем это связано с трудностью получения однородной структуры и фазового состава в объеме заготовки, особенно крупных размеров, остаточной пористостью, необходимостью использования специализированных крупногабаритных печей для реакционного спекания.

Одним из вариантов получения крупногабаритных заготовок зеркал из карбида кремния является сборка зеркал из отдельных элементов шестигранной формы. Такие элементы легче изготовить методами порошковой металлургии и обработать.

На данный момент не разработаны промышленные способы соединения отдельных карбидокремниевых элементов, этот вопрос мало изучен и требует разработки специальных технологий. В отличие от оптического кварцевого стекла и ситалла, которые могут соединяться между собой сплавлением, поэтому можно сваривать большие зеркала и наплавлять на них дополнительный слой, карбидокремниевые элементы соединить между собой без дополнительных операций невозможно. В связи с этим применяют диффузионную сварку, реакционное связывание, реакционную сварку или пайку. Пайка и реакционное связывание оставляют после себя шов на поверх-

ности раздела между соединяющимися частями, при диффузионной сварке из соединяющихся частей образуется бесшовная деталь [8]. Соединение керамических элементов осуществляется также с помощью клеев при комнатной температуре; с помощью металлического и стеклянного припоев в области температур приблизительно 1000 °С, а также реакционным связыванием при ~1400 °С.

Задача соединения элементов из карбидокремниевой керамики решается посредством того [8], что соединяемые элементы приводят в контакт друг с другом в процессе диффузионной сварки в присутствии атмосферы защитного газа и соединяют малодеформирующим образом при использовании температуры не ниже 1600 °С и внешнего давления с образованием монолита, при этом соединяемые элементы испытывают пластическую деформацию в направлении приложения силы менее 5 %. Таким способом могут быть изготовлены керамические элементы сложной формы для деталей с близкими к конечным контурам для производства промышленного оборудования и машиностроения с экстремально высокой термостойкостью, коррозионной стойкостью или износостойкостью, например, пластинчатые теплообменники из спеченной SiC-керамики с экстремально высокой термостойкостью и коррозионной стойкостью.

Однако невозможно полностью использовать их потенциал из-за того, что нет удовлетворительной технологии сварки этих керамических материалов, так как керамика типа SiC не имеет собственного расплава. Различные керамические компоненты могут быть изготовлены отдельно и затем соединены вместе.

Согласно [9], получение новых типов высококачественных керамических изделий затруднено также тем, что промышленные порошки не полностью отвечают современным технологическим требованиям. Из таких порошков без применения специальных технологических приемов нельзя изготовить принципиально новые с точки зрения структуры и свойств керамические материалы. Новые подходы к технологии получения упрочняющих компонентов, принципам выбора спекающих добавок, а также совершенствование методов синтеза порошков и режимов термообработки позволяют значительно повысить физико-химические показатели подобных материалов.

Одним из наиболее перспективных методов получения керамических материалов является реакционное спекание, которое не требует дорогостоящего специального оборудования. Реакционное спекание – особый вид спекания, при котором спекаемый материал уплотняется путем образования нового кристаллического вещества по реакции между одним из компонентов материала, находящимся в виде твердой фазы, и парообразной фазой другого вещества. Происходит своеобразная пропитка пористого тела парообразным веществом, которое вступает в реакцию с основной или специально введенной для осуществления реакции фазой. Реакционным спеканием получают оксидную [10], боридную, нитридную и карбидную керамику [11]. Однако наиболее широко данный метод применяется при получении SiC-керамики.

Преимущества керамики на основе карбида кремния состоят в ее значительной механической прочности при высоких температурах, износостойкости, низком коэффициенте термического расширения, сопротивлении окислению при температурах до 1500 °С, химической инертности, биосовместимости, коррозионной стойкости, устойчивости к радиационным воздействиям, хороших показателях твердости и теплопроводности [4; 9; 12]. Благодаря уникальному сочетанию физико-химических свойств, керамика на основе карбида кремния широко востребована в машиностроении, атомной энергетике, на предприятиях оборонной, металлургической, пищевой, химической, нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности, в аэрокосмической технике.

Обычно технология включает в себя следующие операции: дозирование порошков заданного гранулометрического состава, смешивание со спекающими добавками, временной технологической связкой и выгорающей добавкой (при необходимости), грануляцию шихты, прессование, сушку и обжиг.

Процесс прессования позволяет получать изделия различной формы, но размеры ограничиваются возможностями прессового оборудования.

Процесс спекания изделий из карбида кремния зависит от физико-химической природы модификаторов. Без модифицирующих добавок карбид кремния спекается при температурах 2000–2300 °С. Уплотнение материалов ускоряется при приложении давления в процессе обжига. Карбид кремния не образует жидкой фазы при температурах до 2000 °С, и при горячем прессовании уплотнение осуществляется в основном за счет перемещения частиц и незначительной пластической деформации. Известно, что при давлении до 60 МПа и температурах ниже 2300 °С из чистого карбида кремния можно получить керамику с плотностью не выше 2,7 г/см<sup>3</sup>, пористостью не менее 16 %, что не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к конструкционной керамике. Интенсификации спекания карбида кремния при горячем прессовании достигают путем применения добавок, образующих жидкую фазу, смачивающую карбид кремния, что облегчает процесс перемещения частиц друг относительно друга [13].

Реакционное спекание SiC-керамики производится в специальных засыпках, легко образующих паровую фазу, например Si. Парообразный кремний реагирует с введенным в материал углеродом, образуя SiC. Однако для осуществления данного процесса необходимо применение специальных печей, способных обеспечивать спекание в вакууме и инертной атмосфере при избыточном давлении, что не всегда приемлемо. В связи с этим спекание проводят таким образом, чтобы происходила пропитка жидким кремнием карбидокремниевого каркаса. Кремний в процессе выдержки при спекании взаимодействует с углеродом основы материала, происходит образование карбида кремния.

Реакционное спекание в присутствии жидкой фазы позволяет получать не только высокоплотную керамику, но проводить процессы пайки отдельных элементов для получения габаритных изделий сложной формы [14].

Целью работы является исследование влияния режимов спекания в присутствии жидкого кремния заготовок из SiC керамики на ее структуру и свойства и процессов пайки отдельных элементов из нее.

**Материалы и методы исследования.** Для изготовления образцов использовали порошки карбида кремния марки 64С (ГОСТ 26327–84) и технического углерода марки К354 (ГОСТ 7885–86). Порошок карбида кремния использовали различной дисперсности: 7, 28, 40 мкм. Порошки карбида кремния в количестве 87 мас. % и технического углерода – 13 мас. % смешивали в смесителе типа «пьяная бочка» в течение 6 ч. В готовую смесь добавляли пластификатор в виде 5 %-ного раствора фенолформальдегидной смолы в этиловом спирте, сушили на воздухе и гранулировали.

Образцы прессовали при давлении 100 МПа, подвергали сушке при 120–140 °С на воздухе в течение 1 ч и спекали при температуре 1500, 1650 и 1800 °С в вакууме в присутствии кремния в виде измельченных кремниевых пластин.

Плотность образцов определяли гидростатическим методом или методом обмера и взвешивания, микротвердость – на микротвердомере «Micromet-II». Предел прочности при изгибе определяли на призматических образцах высотой 5 мм, шириной 10 мм, длиной 55 мм по международному стандарту ASTM C78 / C78M-18 на испытательной машине «Tinius Olsen H150K-U» со скоростью нагружения 2 мм/мин.

Структуру образцов исследовали на нетравленных шлифах, изготовленных на алмазных дисках с помощью микроскопа MEF-3 (Австрия).

Содержание свободного кремния определяли с помощью количественного металлографического анализа на шлифах [15].

Для получения изделий сложной формы из реакционноспеченной карбидокремниевой керамики, когда прессованием изготовить такие изделия не представляется возможным, разрабатывалась специальная технология соединения отдельных, простых по форме, реакционноспеченных элементов пайкой материалом специального состава при 1650 °С в вакууме.

Подобная технология была использована в [9]. Соединительная паста готовилась из смеси мелкозернистых порошков SiC и нефтяного кокса, увлажненной жидким бакелитом до жидкотекучего состояния. Для увеличения поверхностного натяжения расплава кремния при последующем силицирующем обжиге в состав пасты вводили добавки тугоплавких металлов хрома или никеля.

В настоящей работе сборную конструкцию получали из семи отдельных шестигранных элементов реакционной пайкой. Сложность реализации операции состоит в малой изученности на практике изготовления сложных изделий из карбидокремниевой керамики из отдельных элементов методом пайки, отсутствием отработанных составов припоя и способов их нанесения на подлежащие пайке поверхности керамических изделий, а также недостаточной смачиваемости карбида кремния расплавом кремния. Краевой угол смачивания в системе Si–SiC составляет  $36^\circ$ , а это приводит к наличию высокой остаточной пористости в структуре паяного шва и, как следствие, его низкой прочности.

Пайку проводили в вакууме при температуре  $1500^\circ\text{C}$  в течение 1 ч.

Для пайки использовали следующие составы припоев:

1 – смесь порошков карбида кремния зернистостью 10 мкм (80 мас. %), дисилицида молибдена (8 мас. %), технического углерода (12 мас. %);

2 – смесь порошков карбида кремния зернистостью 10 мкм (70 мас. %), дисилицида молибдена (7 мас. %), технического углерода (10 мас. %), кремния (13 мас. %);

3 – смесь порошков карбида кремния зернистостью 7 мкм (80 мас. %), дисилицида молибдена (8 мас. %), технического углерода (12 мас. %);

4 – смесь порошков карбида кремния зернистостью 10 мкм (73 мас. %), дисилицида молибдена (7 мас. %), технического углерода (14 мас. %), бора аморфного (6 мас. %).

В качестве пластификатора применяли спиртовой раствор пульвербакелита.

Исследование пайки проводилось с использованием двух шестигранных элементов спаянных между собой по одной из граней. Шестигранные элементы облегченной формы (рис. 1) имели плотность  $2,7\text{ г/см}^3$  и общую пористость 20–25 %, что достигалось предварительным реакционным спеканием при температуре  $1450^\circ\text{C}$ . Наличие свободного кремния в реакционноспеченной карбидокремниевой керамике и пористости позволяет проводить реакционную пайку с одновременной допропиткой карбидокремниевой основы.

Для определения прочности паяного шва проводили испытания разрушения спаяной конструкции методом трехточечного изгиба на универсальной разрывной машине «Tinius Olsen H150KU». Прочность паяного шва оценивали по усилию разрушения.

**Результаты и их обсуждение.** Исследование удельной поверхности порошка карбида кремния показало, что порошок дисперсностью 7 мкм имеет удельную поверхность  $2,8\text{ м}^2/\text{г}$ , 28 мкм –  $2,1\text{ м}^2/\text{г}$ , 40 мкм –  $1,5\text{ м}^2/\text{г}$ , а шихта из смеси этих порошков и технического углерода –  $11,6\text{ м}^2/\text{г}$ .

Дисперсность порошков оказывает влияние на плотность прессовок из карбидокремниевой шихты (рис. 1). Максимальной плотностью обладают образцы из смеси порошков различной дисперсности. Уменьшение размера частиц карбида кремния также приводит к некоторому увеличению плотности прессовок.

Свойства карбидокремниевой керамики зависят как от дисперсности карбида кремния, так и от температуры реакционного спекания. Повышение температуры спекания до  $1650^\circ\text{C}$  привело к повышению прочности до 340 МПа (рис. 2, а), а спекание при  $1800^\circ\text{C}$  – к снижению прочности.

Повышение прочности при спекании при температуре  $1650^\circ\text{C}$  объясняется снижением свободного кремния (рис. 2, б) и увеличением содержания вторичного карбида кремния (рис. 3, б). Снижение прочности карбидокремниевой керамики, спеченной при температуре  $1800^\circ\text{C}$ , связано с ростом размера карбидных зерен (рис. 3, с).

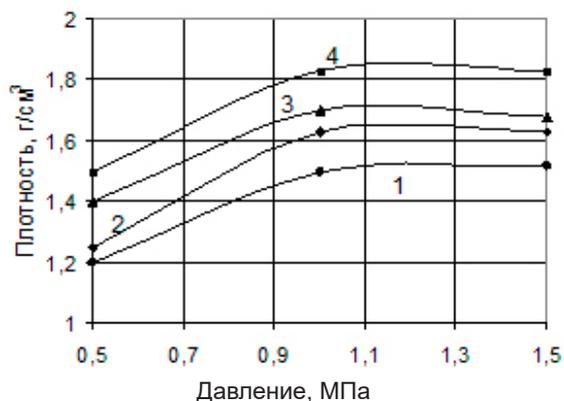


Рис. 1. Влияние давления прессования на плотность образцов из карбида кремния: 1 – 40 мкм, 2 – 28 мкм, 3 – 7 мкм, 4 – смесь порошков

Fig. 1. The effect of pressing pressure on the density of silicon carbide samples: 1 – 40 μm, 2 – 28 μm, 3 – 7 μm, 4 – a mixture of powders

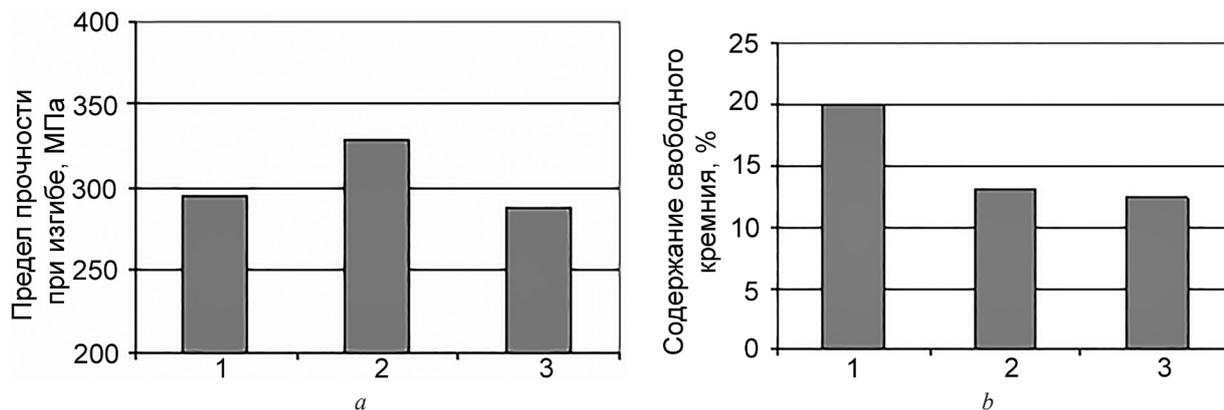


Рис. 2. Влияние температуры реакционного спекания на прочность (а) и содержание свободного кремния (b) в карбидокремниевой керамике, полученной из смеси порошков карбида кремния различной дисперсности: 1 – 1500 °С, 2 – 1650 °С, 3 – 1800 °С

Fig. 2. Influence of the temperature of reaction sintering on the strength (a) and on the content of free silicon (b) in silicon carbide ceramics obtained from a mixture of silicon carbide powders of different dispersion: 1 – 1500 °C, 2 – 1650 °C, 3 – 1800 °C

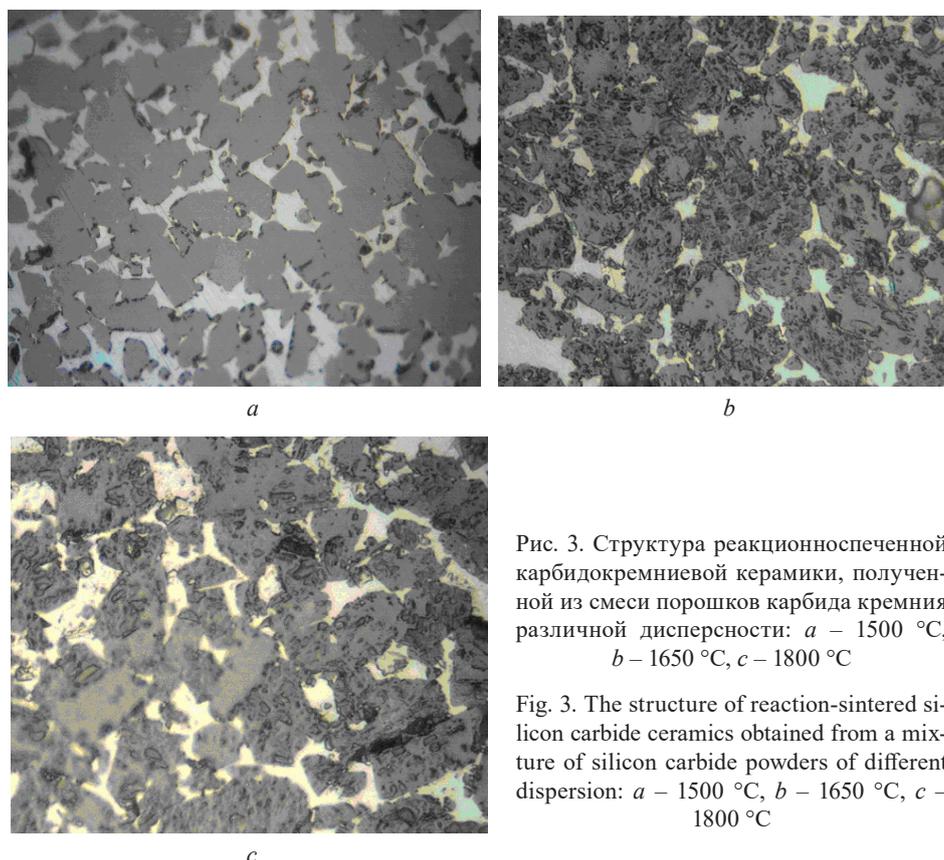


Рис. 3. Структура реакционноспекенной карбидокремниевой керамики, полученной из смеси порошков карбида кремния различной дисперсности: а – 1500 °С, b – 1650 °С, с – 1800 °С

Fig. 3. The structure of reaction-sintered silicon carbide ceramics obtained from a mixture of silicon carbide powders of different dispersion: a – 1500 °C, b – 1650 °C, c – 1800 °C

Исследование влияния режимов пайки шестигранных элементов на прочность паяного шва показало (таблица), что положительное влияние на прочность паяного шва оказывает введение в состав припоя карбида кремния дисперсностью 7 мкм и бора аморфного. В этом случае разрушение происходит не по шву, а по основе материала. Повышение плотности с 2,7 до 2,95 г/см<sup>3</sup> приводит к незначительному снижению усилия разрушения, но и в этом случае разрушение происходит по телу спаиваемых образцов, а не паяному шву. Это свидетельствует о высокой адгезионной прочности керамики на границе «шов–основа», что крайне важно для составной керамической подложки зеркала, полученной с применением пайки.

## Влияние состава припоя и режима пайки на усилие разрушения при трехточечном изгибе

## Influence of the composition of the solder and the soldering mode on the fracture force at three-point bending

Плотность спаиваемых шестигранников, г/см <sup>3</sup> Density of soldered hexagons, g/cm <sup>3</sup>	Номер припоя Solder number	Усилие (Н), характер разрушения Force (N), nature of destruction
2,7	1	150, разрушение по шву
2,7	2	30, разрушение по шву
2,7	3	195, разрушение по материалу
2,7	4	260, разрушение по материалу
2,95	4	256, разрушение по материалу

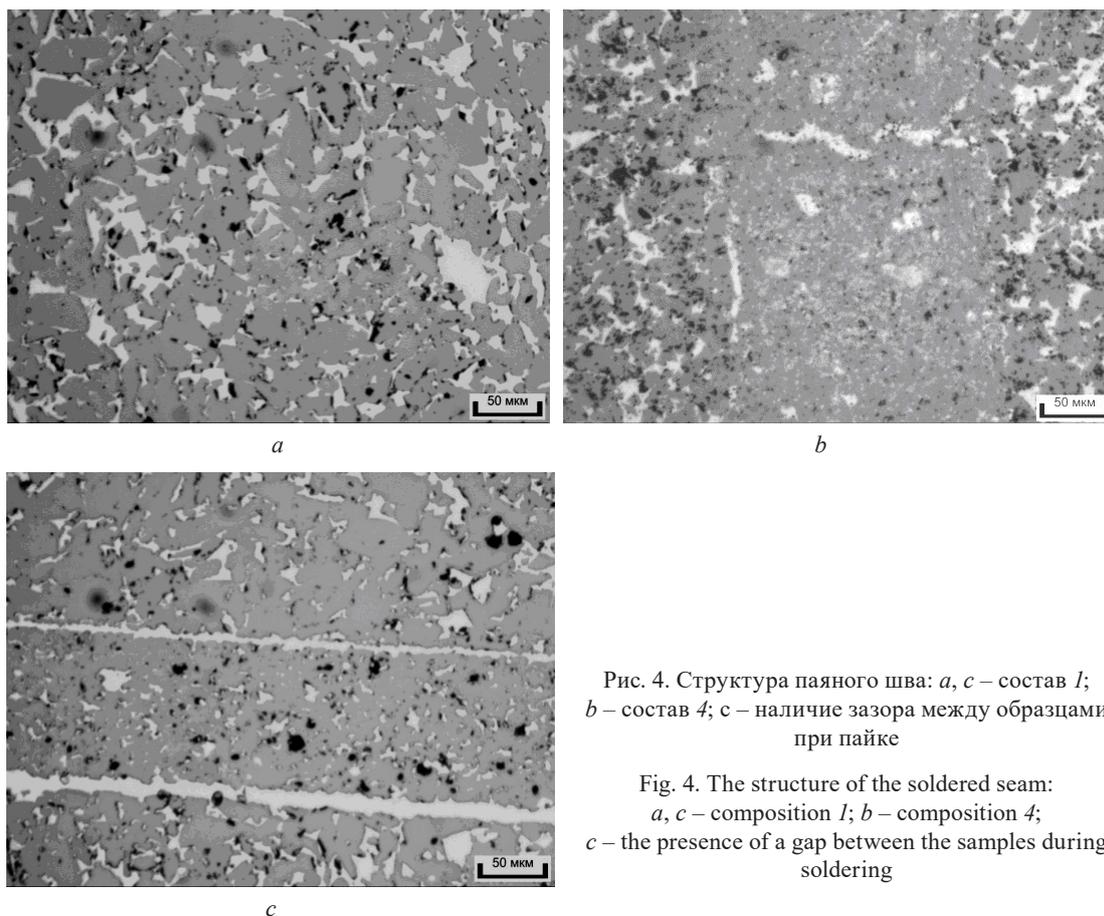


Рис. 4. Структура паяного шва: *a, c* – состав 1; *b* – состав 4; *c* – наличие зазора между образцами при пайке

Fig. 4. The structure of the soldered seam: *a, c* – composition 1; *b* – composition 4; *c* – the presence of a gap between the samples during soldering

Исследование структуры паяного шва подтвердило диффузионную связь шва с основой материала (рис. 4). Структура паяного шва зависит от состава припоя, структура шва первого–третьего составов практически не отличается от состава основы (рис. 4, *a*), четвертого – более мелкодисперсная и характерна меньшим содержанием свободного кремния (рис. 4, *b*).

В случае наличия зазора между спаиваемыми образцами в процессе пайки, на границе паяного шва имеет место прослойка свободного кремния (рис. 4, *c*). Уменьшение толщины зазора, по-видимому, позволит существенно увеличить прочность паяных соединений.

**Заключение.** Исследован процесс получения сложнопрофильных элементов подложки зеркал оптических телескопов из реакционоспеченной карбидокремниевой керамики. Установлено, что дисперсность порошков карбида кремния оказывает влияние на плотность прессовок, максимальной плотностью обладают образцы из смеси порошков дисперсностью 7, 28, 40 мкм в определенном соотношении. Прочность карбидокремниевой керамики также зависит от дисперсности порошка карбида кремния и от температуры реакционного спекания. Повышение температуры спекания с 1500 до 1650 °С приводит к увеличению прочности на 60 МПа, а до 1800 °С – снижению прочности на 40 МПа. Повышение прочности объясняется снижением

содержания свободного кремния и увеличением содержания вторичного карбида кремния, снижение прочности – ростом размера карбидных зерен.

Исследование влияния режимов пайки шестигранных элементов для получения сложнопрофильного элемента подложки зеркала оптического телескопа на прочность паяного шва показало, что положительное влияние на прочность паяного шва оказывает введение в состав припоя на основе карбида кремния порошка карбида кремния дисперсностью 7 мкм и бора аморфного в количестве 6 %. Проведенные испытания паяных образцов при трехточечном изгибе выявили, что разрушение происходит по телу спаиваемых образцов, а не паяному шву. Структура паяного шва зависит от состава припоя и зазора между паяемыми образцами.

### Список использованных источников

1. Житнюк, С. В. Бескислородные керамические материалы для аэрокосмической техники / С. В. Житнюк // Тр. ВИАМ. – 2018. – № 8 (68). – С. 81–88. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88>
2. Кондратюк, А. А. Исследование влияния количества наполнителя на механические характеристики композиционных полимеров / А. А. Кондратюк, С. В. Матренин, О. Ю. Недосекова // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57, № 9/3. – С. 98–102.
3. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы / Е. Н. Каблов [и др.] // Рос. хим. журн. – 2010. – Т. 54, № 1. – С. 20–24.
4. Мэттьюз, Ф. Композиционные материалы. Механика и технология / Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс. – М., 2004. – 408 с.
5. Перспективные конструкционные материалы космических телескопических систем / С. В. Алтухов [и др.] // Сб. трудов III конференции «Будущее оптики». – СПб., 2015. – С. 10–11.
6. Химич, Ю. П. Оптическое формообразование крупногабаритного асферического зеркала из карбида кремния / Ю. П. Химич, Г. В. Евтеев, Д. Б. Никитин // Опт. журн. – 2007. – Т. 74, № 2. – С. 70–72.
7. Савицкий, А. М. Вопросы конструирования облегченных главных зеркал космических телескопов / А. М. Савицкий, И. М. Соколов // Опт. журн. – 2009. – Т. 76, № 10. – С. 94–98.
8. Moore, T. J. Feasibility study of the welding of SiC / T. J. Moore // J. Am. Ceram. Soc. – 1985. – Vol. 68, N 6. – P. 151–153. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1985.tb15224.x>
9. Балкевич, В. Л. Техническая керамика / В. Л. Балкевич. – М., 1984. – 256 с.
10. Абызов, А. М. Исследования в области создания высококачественной алюмооксидной керамики (обзор). Часть 1. Спекание с добавками, реакционное спекание, получение армированных композитов / А. М. Азызов // Стекло и керамика. – 2018. – № 8. – С. 8–19.
11. Шевченко, В. Я. Техническая керамика / В. Я. Шевченко, С. М. Баринов. – М., 1993. – 185 с.
12. Abraham, T. Powder Market Update: Nanoceramic Applications Emerge / T. Abraham // Am. Cer. Soc. Bull. – 2004. – Vol. 83, N 8. – P. 23.
13. Житнюк, С. В. Влияние спекающих добавок на свойства керамики на основе карбида кремния (обзор) / С. В. Житнюк // Тр. ВИАМ. – 2019. – № 3(75). – С. 79–86. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-3-79-86>
14. Состояние и перспективы работ по карбидокремниевой керамике в Институте порошковой металлургии / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия в Беларуси: вызовы времени: сб. науч. тр. ГНПО порошковой металлургии НАН Беларуси. – Минск, 2017. – С. 193–200.
15. Салтыков, С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. – М., 1976. – 271 с.

### References

1. Zhitnyuk S. V. Oxygen-free ceramic materials for the space technics. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, 2018, no. 8(68), pp. 81–88 (in Russian). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88>
2. Kondratuk A. A., Matrenin S. V., Nedosekova O. Yu. Research of influence of the amount of filler on the mechanical characteristics of composite polymers. *Izvestiya vuzov. Fizika* [Russian Physics Journal], 2014, vol. 57, no. 9/3, pp. 98–102 (in Russian).
3. Kablov E. N., Grashchenkov D. V., Isaeva N. V., Solntsev S. S. Promising high-temperature ceramic composite materials. *Russian Chemical Journal*, 2010, vol. 54, no. 1, pp. 20–24 (in Russian).
4. Matthews F. L., Rawlings R. D. *Composite Materials. Engineering and Science*. Woodhead Publ., 1999. 408 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-17714-8>
5. Altukhov S. V., Tulev V. S., Teterina I. V., Fleischer A. G. Perspective structural materials of space telescopic systems. *Sbornik трудов III konferentsii «Budushchee optiki»* [Proceedings of the III Conference “The Future of Optics”]. Saint Petersburg, 2015, pp. 10–11 (in Russian).
6. Khimich Yu. P., Evteev G. V., Nikitin D. B. Optical shaping of a large aspheric mirror composed of silicon carbide. *Journal of Optical Technology*, 2007, vol. 74, no. 2, pp. 133–134. <https://doi.org/10.1364/jot.74.000133>
7. Savitskii A. M., Sokolov I. M. Questions of constructing lightened primary mirrors of space telescopes. *Journal of Optical Technology*, 2009, vol. 76, no. 10, pp. 666–669. <https://doi.org/10.1364/jot.76.000666>

8. Moore T. J. Feasibility study of the welding of SiC. *Journal of the American Ceramic Society*, 1985, vol. 68, no. 6, pp. 151–153. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1985.tb15224.x>
9. Balkevich V. L. *Technical ceramics*. Moscow, 1984. 256 p. (in Russian).
10. Abyzov A. M. Studies in high-performance alumina ceramics development (review). Part 1. Sintering with additives, reactive sintering, reinforced composites production. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics], 2018, no. 8, pp. 8–19 (in Russian).
11. Shevchenko V. Ya., Barinov S. M. *Technical ceramics*. Moscow, 1993. 185 p. (in Russian).
12. Abraham T. Powder Market Update: Nanoceramic Applications Emerge. *American Ceramics Society Bulletin*, 2004, vol. 83, no. 8, pp. 23.
13. Zhitnyuk S. V. Effect of sintering additives on the properties of silicon carbide-based ceramics (review). *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, 2019, no. 3 (75), pp. 79–86 (in Russian). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-3-79-86>
14. Ilyushchenko A. F., Mironovich G. A., Osipov V. A., Zvonarev E. V. State and prospects of work on silicon carbide ceramics at the Institute of Powder Metallurgy Powder metallurgy in Belarus: challenges of the time. *Poroshkovaya metallurgiya v Belarusi: vyzovy vremeni: sbornik nauchnykh trudov GNPO poroshkovo metallurgii NAN Belarusi* [Powder metallurgy in Belarus: challenges of the time: collection of scientific papers GNPO Powder Metallurgy of the NAS of Belarus]. Minsk, 2017, pp. 193–200 (in Russian).
15. Saltykov S. A. *Stereometric metallography*. Moscow, 1976. 271 p. (in Russian).

### Информация об авторах

*Ильющенко Александр Федорович* – член-корреспондент, д-р техн. наук, профессор, директор. Институт порошковой металлургии им. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexil@mailbelpak.by.

*Дьячкова Лариса Николаевна* – д-р техн. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт порошковой металлургии им. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dyachkova@tut.by.

*Осипов Владимир Анатольевич* – ст. науч. сотрудник. Институт порошковой металлургии НАН Беларуси (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Alexil@mailbelpak.by.

### Information about the authors

*Ilyushchenko Alexandr Ph.* – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, Director. Powder Metallurgy Institute named after O. V. Roman (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexil@mailbelpak.by.

*Dyachkova Larisa N.* – D. Sc. (Engineering), Associate professor, Head of the Laboratory. Powder Metallurgy Institute named after O. V. Roman (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dyachkova@tut.by.

*Osipov Vladimir A.* – Senior researcher. Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Alexil@mailbelpak.by.

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

УДК 621.91.01  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-739-746>

Поступило в редакцию 07.10.2020  
Received 07.10.2020

**М. Л. Хейфец**

*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ТРАДИЦИОННОГО И АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*(Представлено академиком П. А. Витязем)*

**Аннотация.** Проведен анализ стадий и этапов проектирования технологического оборудования для традиционного производства, изучены особенности формирования технологического оборудования, использующего потоки энергии и расходных материалов. Структурный синтез мехатронных комплексов в цифровизированном производстве позволил дополнить новыми этапами процесс создания технологического оборудования как для традиционного автоматизированного субтрактивного, так и нового аддитивного производства. Описанные алгоритмами по предложенной структурной диаграмме связей процессы изготовления деталей без формообразующей оснастки предоставляют возможность анализировать существующее и разрабатывать новое оборудование для послойного синтеза изделий. Показано, как при проектировании технологического оборудования для его использования в новом аддитивном и традиционном субтрактивном производстве применяются методы и схемы послойного синтеза и формообразования деталей из композиционных материалов, построенные на использовании различных потоков энергии и компонентов материала, а также методы и схемы автоматизации и компьютерного управления процессами производства изделий.

**Ключевые слова:** технологическое оборудование, аддитивное и субтрактивное производство, послойный синтез, формообразование изделий

**Для цитирования.** Хейфец, М. Л. Проектирование мехатронных технологических комплексов для традиционного и аддитивного производства / М. Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 739–746. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-739-746>

**Mikhail L. Kheifetz**

*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic Belarus*

## **DESIGN OF MECHATRONIC TECHNOLOGICAL COMPLEXES FOR TRADITIONAL AND ADDITIVE MANUFACTURING**

*(Communicated by Academician Petr A. Vityaz)*

**Abstract.** The analysis of the stages and stages of the design of technological equipment for traditional production, studied the features of the formation of technological equipment using flows of energy and consumables. Structural synthesis of mechatronic complexes in digitalized production allowed adding new stages to the process of creating technological equipment for both traditional automated subtractive and new additive manufacturing. The processes of manufacturing parts without shaping equipment described by the algorithms according to the proposed structural diagram of connections provide an opportunity to analyze existing and develop new equipment in laminate synthesis of products. It is shown, how in the design of technological equipments for their use in new additive and traditional subtractive manufacturing, methods and schemes of laminate synthesis and shaping of parts from composite materials are used, based on the use of various energy flows and material components, as well as methods and schemes of automation and computer product manufacturing process management.

**Keywords:** technological equipment, additive and subtractive manufacturing, laminate synthesis, product shaping

**For citation:** Kheifetz M. L. Design of mechatronic technological complexes for traditional and additive manufacturing. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 739–746 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-739-746>

**Введение.** При проектировании, включающем структурный синтез и параметрическую оптимизацию, технологических комплексов оборудования, используемого в традиционном субтрактивном и в новом аддитивном производстве, применяются как широко известные, так и но-

вые методы и схемы формообразования и послойного синтеза изделий, а также интенсивные процессы модифицирования свойств материалов концентрированными и распределенными потоками энергии [1–5].

Традиционно исходные данные для проектирования технологического оборудования содержит техническое задание конкретного заказчика, включающее только: 1) данные о материалах и готовых изделиях; 2) производительность оборудования; 3) характер и тип производства; 4) уровень автоматизации и встраиваемость в современное высокотехнологичное производство [6; 7].

Однако этих сведений недостаточно при проектировании комплексов технологического оборудования, использующего распределенные поля и концентрированные потоки энергии [1–3], для компьютерно управляемого субтрактивного и аддитивного производства [4; 5]. Связано это с тем, что как для традиционных типов субтрактивного, так и новых типов аддитивного производства, заключающихся в послойном наращивании поверхности изделий, при проектировании требуется дополнительно рассматривать подвод и распределение материала и энергии [8; 9].

В связи с этим целью работы являлось развитие существующей методологии проектирования комплексов технологического оборудования при компьютерном управлении технологическими процессами как для традиционных методов комбинированного электро-физико-химического формообразования деталей, так и для новых методов послойного синтеза изделий из композиционных материалов в аддитивном производстве.

**Анализ стадий и этапов проектирования технологического оборудования для производства традиционного типа.** Последовательность расчета технологического оборудования для производства традиционного типа включает 8 укрупненных стадий, опирающихся на расчетные схемы [4; 6; 7]:

1. Компонировка и выбор кинематической схемы.
2. Модульное построение по ограничительному набору агрегатов и узлов [10; 11].
3. Расчеты статических упругих перемещений, выбор схемы и прочностные расчеты.
4. Динамические расчеты устойчивости движений системы и статических отклонений элементов, выбор схемы и динамические расчеты.
5. Тепловые расчеты, выбор термодинамической схемы и расчет температур.
6. Точностные расчеты, включающие определение точности геометрических и кинематических связей с учетом деформаций: общей, термической и в контакте.
7. Расчеты надежности и долговечности, включающие определение надежности агрегатов и узлов, с учетом тепловых и деформационных процессов трения и изнашивания, и в завершение экономическое обоснование ресурса.
8. Анализ человеко-машинной системы, включающей также охрану труда и технику безопасности на производстве [6].

Далее по стадиям для технологического оборудования ведется расчет основных систем: 1) несущих; 2) направляющих движений; 3) приводов движений и других.

Проектирование и расчет основных систем производится по техническим требованиям для механических агрегатов, технологической оснастки и средств автоматизации; систем смазки, электрооборудования и программируемых систем; систем диагностики, с учетом техники безопасности, эргономики и технологичности станка [4; 6; 7].

Для этого в первую очередь строятся схемы систем с учетом ограничительных наборов агрегатов и узлов: 1) кинематическая, 2) технологических модулей [10; 11], 3) прочностная, 4) динамическая, 5) термодинамическая, 6) контакта и трения, 7) изнашивания и надежности, 8) человеко-машинная система в целом [6].

Затем после структурного синтеза проводится параметрическая оптимизация [12; 13], определяются основные параметры систем технологического оборудования.

Так, определение параметров кинематического модуля часто связано с оптимизацией его структуры, в частности, за счет рационального размещения в нем органов настройки [14]. Задача эта относится к структурно-параметрическому синтезу и оптимизации, в результате которых формируется рациональная структура объекта и находятся значения параметров его элементов, удовлетворяющие требованиям синтеза с оптимизацией при настройке.

Путь решения этой задачи рассмотрим на примере дифференциального механического модуля с двумя ведущими звеньями 1 и 3, выходным звеном 6 и двумя органами настройки  $i_x$  и  $i_y$  (рис. 1), который может использоваться для параллельного соединения двух кинематических групп [14].

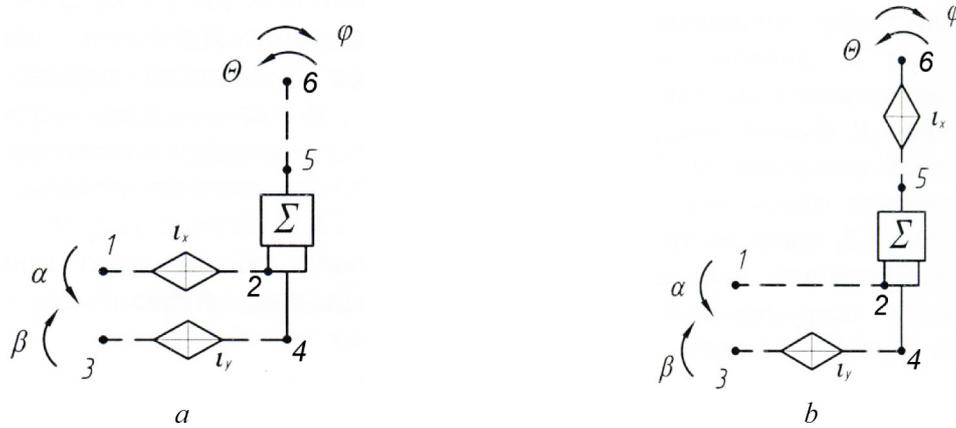


Рис. 1. Кинематические схемы соединения внутренних связей звеньев 1–6 кинематической цепи с расположением органов настройки  $i_x$  и  $i_y$  в автономных участках (а) и в общем участке (b)

Fig. 1. Kinematic diagrams of the connection of the internal connections of links 1–6 of the kinematic chain with the arrangement of the adjustment elements  $i_x$  and  $i_y$  in autonomous areas (a) and in a common area (b)

Кинематические связи модуля  $1 \rightarrow 2 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 6$  и  $3 \rightarrow 4 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 6$  имеют общий участок 5–6 и присоединенные к нему через суммирующий механизм  $\Sigma$  автономные участки 1–2 и 3–4. Орган настройки  $i_x$  первой кинематической группы может быть расположен или в ее автономном участке 1–2 (рис. 1, а) или в общем участке (рис. 1, б). Аналогично орган настройки  $i_y$  второй кинематической группы также может быть расположен в ее автономном участке 3–4 или в общем участке.

Поэтому проанализируем различные варианты размещения органов настройки  $i_x$  и  $i_y$  [14]. Пусть с начала они находятся в указанных автономных участках внутренних связей, тогда структуру этих связей можно представить следующим образом:

$$\alpha \rightarrow 1 \rightarrow i_x \rightarrow 2 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow \varphi + \theta$$

$$\uparrow$$

$$\beta \rightarrow 3 \rightarrow i_y \rightarrow 4.$$

Когда один из органов настройки находится в общем участке 5–6, и если в нем расположить орган  $i_x$ , то получается следующая структура внутренних связей модуля:

$$\alpha \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow i_x \rightarrow 6 \rightarrow \varphi + \theta$$

$$\uparrow$$

$$\beta \rightarrow 3 \rightarrow i_y \rightarrow 4.$$

При расположении органов настройки по первому варианту требуется перенастраивать оба органа настройки, что связано с увеличением трудоемкости, также зачастую невозможно обеспечить одинаковые значения передаточного отношения органа настройки и, следовательно, идентичность обработанных изделий по определенному параметру  $x$ . Поскольку во втором варианте значение  $i_y$  не зависит от параметра  $x$ , то при переходе к обработке изделия с иным значением этого параметра, требуется изменить передаточное отношение только органа  $i_x$ .

Каждый вариант структуры кинематического модуля характеризуется определенными значениями параметров органов настройки, по-разному влияющих на функциональные свойства проектируемого объекта, в данном случае формообразующей системы комплекса технологического оборудования [14]. Таким образом, синтез проектируемого объекта сводится к целенаправленному анализу возможных вариантов его структуры и определению варианта с рациональными значениями настраиваемых параметров.

Следует отметить, что при создании для автоматизированного субтрактивного и аддитивно-го производства, комплексов технологического оборудования, использующего концентрированные и распределенные потоки энергии [1–3], укрупненных 8 стадий с определением параметров систем, выбором структур и соответствующих им схем недостаточно [4; 5]. Связано это с тем, что для традиционных типов субтрактивного и новых типов аддитивного производства, заключающихся в послойном наращивании поверхности изделий, на последующих дополнительно вводимых этапах проектирования требуется рассматривать схемы и определять параметры модулей технологического оборудования, описывающие подвод и распределение материала и энергии [8; 9].

**Особенности проектирования комплексов технологического оборудования, использующего потоки энергии.** Широко применяемые в мировом производстве технологии позволяют заключить, что наиболее перспективно применение оборудования по наращиванию слоев и формообразованию поверхностей изделий, использующего различные сочетания потоков материала и энергии. Это в свою очередь ставит задачи распределения компонентов материала и источников энергии не только по заданному контуру или поверхности, но и по глубине от поверхности изделия, а также по характеру импульсов подачи материала и энергии [4; 5; 8; 9].

Задачи распределения потоков материала и энергии помогают решить критерии тепломассопереноса, устанавливающие последовательность структурообразования в обрабатываемом материале и на формируемой поверхности при увеличении мощности воздействий [4; 8; 15]:

$$\begin{array}{c} \overbrace{\text{(Re In)} \quad \text{(Re In)}} \\ \text{Pe (1 / Pr)} \Rightarrow \text{Re(Pr Ds)} \Rightarrow \text{Mr(Re / Pr)(In / Ds)} \Rightarrow \text{Gr(Pr)} \Rightarrow \text{Rl} , \\ \underbrace{\text{(Ds)} \quad \text{(Re In / Ds)}} \end{array} \quad (1)$$

в которой  $\text{Pe} = \omega t / \omega$  – критерий Пекле;  $\text{Pr} = \nu / \omega$  – критерий Прандтля;  $\text{Re} = \omega t / \nu$  – критерий Рейнольдса;  $\text{In} = \beta g \nabla T t^2 / \nu^2$  – отношение подъемной силы плавучести к инерционной силе;  $\text{Ds} = \sigma_k \nabla T t / (\nu \rho / \nu)$  – отношение сил капиллярности и вязкости;  $\text{Mr} = \sigma_k \nabla T t^2 / (\rho \omega \nu)$  – критерий Марангони;  $\text{Gr} = \beta g \nabla T t^4 / \nu^2$  – критерий Грасгофа;  $\text{Rl} = \beta g \nabla T t^4 / (\omega \nu)$  – критерий Рэлея; где  $t$  – характерный размер;  $\omega$  – коэффициент температуропроводности;  $\nu$  – скорость;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения;  $g$  – ускорение свободного падения;  $T$  – абсолютная температура;  $\sigma_k$  – коэффициент термокапиллярности;  $\rho$  – плотность технологической среды.

Критерии, характеризующие потоки энергии, при электро-физико-химической обработке оказывают существенное влияние на последовательность пространственных явлений и помогают управлять формированием свойств обрабатываемого материала [4; 8; 15]:

$$\text{Sm}(Em / Se) \Rightarrow Si \text{ и } \text{Mr}(Ek) \Rightarrow E(Tk / Ek) \Rightarrow \text{Rl}, \quad (2)$$

в которых  $\text{Sm} = IB / (\nu^2 \rho t)$  – критерий магнитного воздействия;  $Em = \nu E_1 / (B)$  – отношение скорости потока к его теплосодержанию и напряженности электрического поля к его магнитной индукции;  $Se = E_1 t^2 / (IR)$  – критерий напряженности электрического поля;  $Si = P R / (\nu \rho H' t^3)$  – энергетический критерий;  $Ek = \varepsilon \gamma^2 \nabla T / \sigma_k$  – отношение термоэлектрической и капиллярной сил;  $E = \varepsilon \gamma^2 \nabla T^2 t^2 / (\rho \omega \nu)$  – термо-электрический критерий;  $Tk = \rho \beta g t^2 / \sigma_k$  – отношение подъемной силы плавучести к капиллярной силе; где  $I$  – сила тока;  $B$  – магнитная индукция;  $H'$  – энтальпия потока;  $R$  – электросопротивление;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $\gamma$  – коэффициент термоэлектродвижущей силы;  $E_1$  – напряженность электрического поля.

Использование последовательностей критериев переноса (1) и (2) для анализа процессов образования структур и фаз материала многократно сокращает объем экспериментальных исследований технологии формирования поверхностного слоя при комбинированных методах термо-механической и электро-физико-химической обработки [4; 8; 15].

При образовании неустойчивых структур поверхностных слоев целесообразно по критерию Рейнольдса  $Re = vt / \nu$  определять турбулентность течений и потоков обрабатываемого материала и описывать волнистость и шероховатость формирующегося рельефа поверхности  $R$ . Толщина формируемого слоя  $t$  определяет увеличение или снижение его массы  $Q$ , а с учетом сплошности или пористости послойноформируемого материала или покрытия изменяется их относительная твердость  $H_\varepsilon = \Delta H / H$ . Поэтому толщина слоя  $t$  пропорциональна выражению  $Q / (1 - H_\varepsilon)$  [2; 4; 15].

В результате при управлении потоками энергии целесообразно использовать соотношения, пропорциональные критериям переноса, для оптимизации геометрических характеристик рельефа поверхности:

$$R \sim \frac{\nu_S [Q / (1 - H_\varepsilon)]}{(B / I)(\nu / S)} = \frac{\nu_S I Q}{\nu B (1 - H_\varepsilon)} \quad (3)$$

и для оптимизации физико-механических параметров относительного упрочнения материала поверхностного слоя из соотношения (3) получаем:

$$H_\varepsilon \sim 1 - \frac{\nu_S S I Q}{\nu B R}, \quad (4)$$

где  $\nu_S$  – суммарная скорость главного  $\nu$  и дополнительного  $S$  движений.

Соотношения (3) и (4) показывают положительную обратную связь рельефа  $R$  и отрицательную обратную связь упрочнения  $H_\varepsilon$  с производительностью обработки  $\nu_S Q$ , а также с регулируемые кинематическими характеристиками оборудования ( $S / \nu$ ) и мощностью источника энергии ( $I / B$ ) [2; 4; 15].

Анализ соотношений (3) и (4) позволяет выделить основные принципы организации обратной связи в открытой технологической системе.

В случае, когда в первую очередь необходимо сформировать поверхность (3), а затем ее упрочнить (4), как, например, при деформировании и резании, в технологической системе при термомеханических воздействиях создается положительная обратная связь. Избыточные степени свободы инструмента и технологической среды, подавляя рассеяние потоков энергии и вещества в формоизменяемом припуске, создают упрочняющие структуры в поверхностном слое и повышают производительность обработки [2; 4; 9].

В том случае, когда сначала требуется упрочнить (4), а затем сформировать рельеф поверхности (3), как, например, при нанесении покрытий, в технологической системе при электро-физико-химических воздействиях организуется отрицательная обратная связь. Дополнительные воздействия источниками энергии и веществами, формируя упрочняющие структуры в поверхностном слое, не допускают развития неустойчивости процесса при образовании рельефа поверхности и при его стабилизации не позволяют поднять производительность обработки [2; 4; 5].

С учетом контуров прямых и обратных связей в технологической системе, требуется также изучать схемы числового программного управления и рассматривать комплекс технологического оборудования как мехатронную систему [1; 2; 4].

**Проектирование комплексов технологического оборудования для аддитивного производства изделий.** Если рассматривать комплекс технологического оборудования с позиций компьютеризации производственной деятельности, то оборудование для аддитивного производства, его узлы и детали следует проектировать как устройства компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ.

Для обозначения процессов аддитивного производства изделий в технологической системе чаще всего употребляют термины: прямое получение изделий сложной формы – «выращивание» (Solid Freeform Fabrication); послойное создание – «синтез» (Laminate Synthesis); быстрое макетирование – «прототипирование» (Rapid Prototyping); формирование трехмерных объектов – «печать» (3D Component Forming). Поэтому следует определить взаимосвязи процессов формообразования и провести разграничения используемых терминов [4; 5; 16].

Для самовоспроизведения объектов, согласно модели фон Неймана [16], требуются машины: С – «копировщица плана построения»; О – «исполнительница плана построения»; S – «пусковое

устройство» (включающее С и О в надлежащее время);  $V_{C+O+S}$  – «план построения автомата» (описывающий все элементы модели). В результате весь автомат выражается символически  $C + O + S + V_{C+O+S}$ . После начального запуска S получает в свое распоряжение план построения автомата в целом  $V_{C+O+S}$ , С копирует его, а О в свою очередь следует ему для построения С, О и S. Тогда, можно представить [4; 5; 16]: запуск (S) как прямой доступ к потокам вещества и энергии; получение плана ( $V_{C+O+S}$ ) как самонастройку программы воспроизведения; копирование плана (С) как трансляцию информационного потока; построение автомата (О) как самоорганизацию его структуры.

Исследование процессов производства деталей без использования формообразующей оснастки [4; 5; 16] в зависимости от агрегатного состояния исходного материала, размерности потоков формообразующей среды и последовательности технологических операций позволило представить совокупность методов «выращивания» деталей в виде структурной диаграммы связей (рис. 2).

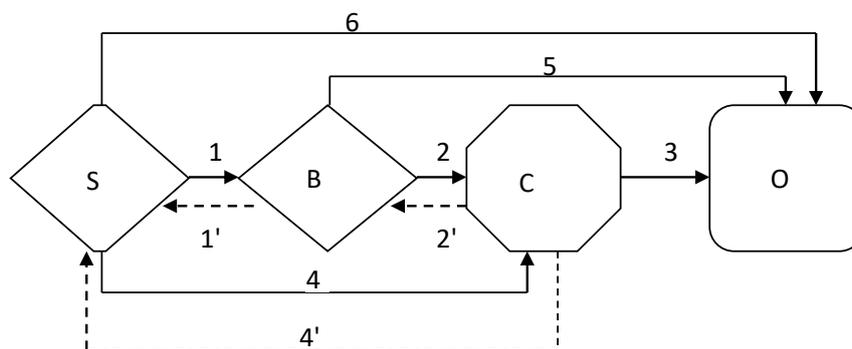


Рис. 2. Структурная диаграмма связей в способах изготовления деталей машин без формообразующей оснастки

Fig. 2. Structural diagram of connections in the methods of manufacturing machine parts without shaping equipment

Структурная диаграмма связей представляет собой направленный замкнутый граф и описывает автомат с конечным числом состояний [4; 5; 16]. Вершины графа изображают процессы создания деталей без формообразующей оснастки и представляют логические операции: трансляцию информации, потоков вещества и энергии; запуск и остановку автоматического цикла.

Ребра графа отражают изменения состояний ( $1-6$  и  $1', 2', 4'$ ) материала технологической среды, а маршруты предусматривают различные комбинации изменений в зависимости от выбора начального и порядка выполнения последующих процессов. Так, разные варианты технологических маршрутов имеют вид различных последовательностей при выборе в качестве начального процесса (рис. 2):

прямого получения деталей сложной формы:  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3; 4 \rightarrow 3; 1 \rightarrow 5; 4 \rightarrow 2' \rightarrow 5; 6;$

послойного создания:  $1' \rightarrow 4 \rightarrow 3; 2 \rightarrow 3; 1' \rightarrow 6; 2 \rightarrow 4' \rightarrow 6; 5;$

быстрого макетирования:  $2' \rightarrow 1' \rightarrow 6; 4' \rightarrow 6; 2' \rightarrow 5; 4' \rightarrow 1 \rightarrow 5; 3.$

Рассматривая замену в модели самовоспроизведения процессов (прямого доступа к потокам вещества и энергии; самонастройки программы воспроизведения; трансляции информационного потока; самоорганизации структуры автомата) обеспечивающими их элементами традиционной неадаптивной технологической системы (деталью, инструментом, приспособлением, станком), приходим к выводу, что невозможно только при использовании формообразующей оснастки создать конечный автомат, так как для изготовления детали должна существовать оснастка, а, в свою очередь, для ее создания должна быть также изготовлена оснастка и т. д.

Таким образом, предложенные согласно модели самовоспроизведения фон Неймана алгоритмы [4; 5; 16] позволяют описывать способы изготовления деталей машин без формообразующей оснастки, а обратные им последовательности – неадаптивные способы, использующие оснастку, непредставимы в качестве конечного автомата.

Описание в соответствии с существующими терминами процессов изготовления деталей без формообразующей оснастки алгоритмами по предложенной структурной диаграмме связей пре-

доставляет возможность анализировать существующие и разрабатывать новые технологические комплексы для прямого «выращивания» изделий [4; 5].

**Проектирование комплексов мехатронного технологического оборудования в цифровизированном производстве.** Мехатронные системы включают механическую, электромеханическую, электронную и управляющую части [2; 4]. В нее входят: датчики состояния как внешней среды, так и самой системы управления; источники энергии; исполнительные механизмы; усилители; вычислительные элементы (компьютеры и микропроцессоры).

Мехатронная система представляет собой единый комплекс электромеханических и электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется непрерывный обмен энергией и информацией. Функционально простую мехатронную систему технологического комплекса можно подразделить на следующие составные части: исполнительные устройства (объект управления и приводы), информационные устройства (датчики внутреннего состояния системы и датчики состояния внешней среды) и систему управления (компьютер и микропроцессоры).

Взаимодействие между этими частями, реализующее прямые и обратные связи в системе, осуществляется через устройство сопряжения (интерфейс). Система управления включает аппаратные средства и программное обеспечение, которое обеспечивает согласованную работу аппаратных средств и синхронизацию процессов сбора и обработки данных, поступающих от информационных устройств, с процессами, управляющими исполнительными устройствами.

В технологических системах заранее определить число и вид необходимых исполнительных устройств и датчиков невозможно [2; 4]. Поэтому возникает необходимость решить две задачи: 1) обработать и систематизировать информацию, поступающую с датчиков; 2) обеспечить синхронизацию между этой информацией и движением исполнительных устройств. Это достигается программным обеспечением, управляющим работой соответствующих вычислительных средств. Следовательно, ключевую роль в обеспечении многофункциональной работы мехатронной системы играют алгоритмические и программные средства.

**Заключение.** Таким образом, анализ стадий и этапов проектирования технологического оборудования для производства традиционного типа и изучение особенностей формирования комплексов технологического оборудования, использующего потоки энергии и расходных материалов, исследование структурного синтеза мехатронных комплексов в цифровизированном производстве позволили дополнить новыми этапами процесс проектирования комплексов автоматизированного технологического оборудования как для традиционного субтрактивного, так и нового аддитивного производства.

Дополнительные этапы проектирования включают: сначала – выбор источников энергии и расходных материалов для интенсификации процессов с анализом технологической среды, использующей потоки энергии и материала; затем – выделение прямых и обратных связей в компьютеризированной технологической системе при электро-физико-химических и термомеханических воздействиях; в заключение – анализ процессов адаптации комплекса оборудования в производственной системе, включающих самонастройку программы и самоорганизацию структуры автоматизированного комплекса.

В результате на основе дополнительных этапов производятся: структурный анализ открытой производственной системы и синтез технологических комплексов, использующих источники энергии и расходных материалов; параметрическая оптимизация модулей и установок, инструментов и средств оснащения технологического комплекса; компоновка производственных модулей и синтез адаптивной мехатронной системы высокоэффективной обработки.

#### Список использованных источников

1. Проектирование технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий на основе многофакторной оптимизации / П. И. Ящерицын [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 1997. – Т. 41, № 3. – С. 112–118.
2. Проектирование мехатронных технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий / П. И. Ящерицын [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2003. – Т. 47, № 6. – С. 120–124.
3. Анализ свойств отношений технологических решений при проектировании комбинированных методов обработки материалов / П. И. Ящерицын [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2001. – Т. 45, № 4. – С. 106–109.

4. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск, 2012. – 239 с.
5. Витязь, П. А. «Индустрия 4.0»: от информационно-коммуникационных и аддитивных технологий к самовоспроизведению машин и организмов / П. А. Витязь, М. Л. Хейфец, С. А. Чижик // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2017. – № 2. – С. 54–72.
6. Машиностроение: энциклопедия / Б. И. Черпаков [и др.]; под ред. Б. И. Черпакова. – М., 2002. – Т. IV-7: Металлорежущие станки и деревообрабатывающее оборудование. – 864 с.
7. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем / А. С. Проников [и др.]; под ред. А. С. Проникова. – М., 1994. – Т. 1: Проектирование станков. – 444 с.
8. Технологические основы управления качеством машин / А. С. Васильев [и др.]. – М., 2003. – 256 с.
9. Хейфец, М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М. Л. Хейфец. – М., 2005. – 272 с.
10. Базров, Б. М. Модульная технология в машиностроении / Б. М. Базров. – М., 2001. – 368 с.
11. Базров, Б. М. Метод представления изделия как объекта цифровизации производства структурированным множеством модулей / Б. М. Базров, М. Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 377–384. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384>
12. Артоболевский, И. И. Основы синтеза систем машин автоматического действия / И. И. Артоболевский, Д. Я. Ильинский. – М., 1983. – 280 с.
13. Врагов, Ю. Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: Основы компонетики / Ю. Д. Врагов. – М., 1978. – 208 с.
14. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск, 2014. – 316 с.
15. Использование критериев подобия для комбинированных методов обработки материалов / А. И. Гордиенко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2004. – Т. 48, № 4. – С. 107–110.
16. Хейфец, М. Л. Анализ алгоритмов производства изделий по модели самовоспроизведения фон Неймана / М. Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2001. – Т. 45, № 5. – С. 119–122.

## References

1. Yashcheritsyn P. I., Kheifets M. L., Kozhuro L. M., Chemisov B. P. Designing technological complexes of high-effective treatment of products on the basis of products multifactorial optimization. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 1997, vol. 41, no. 3, pp. 112–118 (in Russian).
2. Yashcheritsyn P. I., Kheifets M. L., Zeveleva E. Z., Akulovich L. M. Designing of mechatronic technological complexes of high-performance processing. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2003, vol. 47, no. 6, pp. 120–124 (in Russian).
3. Yashcheritsyn P. I., Averkhenkov V. I., Kheifets M. L., Kukhta S. V. Analysis of the properties of ratios of technological solutions in designing combined methods of the treatment of materials. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2001, vol. 45, no. 3, pp. 106–109 (in Russian).
4. Rusetsky A. M., ed. *Theoretical bases of technological systems designing*. Minsk, 2012. 239 p. (in Russian).
5. Vitiaz P. A., Kheifetz M. L., Chizhik S. A. “Industry 4.0”: from information and communication and additive technologies to self-reproduction of machines and organisms. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 2, pp. 54–72 (in Russian).
6. Cherpakov B. I., ed. *Mechanical engineering: Encyclopedia. Vol. IV-7: Metal-cutting machines and woodworking equipment*. Moscow, 2002. 864 p. (in Russian).
7. Pronikov A. S., ed. *Design of metal-cutting machine tools and machine-tool systems. Vol. 1: Machine tools design*. Moscow, 1994. 444 p. (in Russian).
8. Vasil'ev A. S., Dal'sky A. M., Klimenko S. A., Polonsky L. G., Kheifetz M. L., Yashcheritsyn P. I. *Technological fundamentals of machine quality management*. Moscow, 2003. 256 p. (in Russian).
9. Kheifetz M. L. *Design process of combined processing*. Moscow, 2005. 272 p. (in Russian).
10. Bazrov B. M. *Modular technology in mechanical engineering*. Moscow, 2001. 368 p. (in Russian).
11. Bazrov B. M., Kheifetz M. L. Method of presenting a product as an object of digitalization of manufacturing by a structured set of modules. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 377–384 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384>
12. Artobolevsky I. I., Il'insky D. Ia. *Bases of synthesis of systems of cars of automaticaction*. Moscow, 1983. 280 p. (in Russian).
13. Vragov Yu. D. *Analysis of configurations of metal-cutting machines: Komponetika bases*. Moscow, 1978. 208 p. (in Russian).
14. Rusetsky A. M., ed. *Design and equipment of technological systems*. Minsk, 2014. 316 p. (in Russian).
15. Gordienko A. I., Kozhuro L. M., Kheifetz M. L., Kukhta S. V. Use of analogy parameters for development of combined physical-chemical material processing methods. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2004, vol. 48, no. 4, pp. 107–110 (in Russian).
16. Kheifets M. L. Analysis of the algorithms of production of machine parts by models of von Neumann's self-reproduction. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2001, vol. 45, no. 5, pp. 119–122 (in Russian).

## Информация об авторе

Хейфец Михаил Львович – д-р техн. наук, профессор, директор. Институт прикладной физики НАН Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mlk-z@mail.ru.

## Information about the author

Kheifetz Mikhail L. – D. Sc. (Engineering), Professor, Director. Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic Belarus). E-mail: mlk-z@mail.ru.

ISSN 1561-8323 (Print)  
ISSN 2524-2431 (Online)  
УДК 536.4:544.452.12

Поступило в редакцию 20.10.2020  
Received 20.10.2020

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-747-756>

**В. В. Лещевич, академик О. Г. Пенязьков, С. Ю. Шимченко**

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

## ОСОБЕННОСТИ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПАРОВ Н-ДЕКАНА В ВОЗДУХЕ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 600–800 К

**Аннотация.** В условиях быстрого адиабатического сжатия изучены особенности самовоспламенения паров н-декана в воздухе при температуре 600–800 К, давлении 0,8–1,2 МПа, эквивалентных отношениях  $\phi = 0,5–1,5$  и постоянной плотности смеси  $5,0 \pm 0,5$  кг/м<sup>3</sup>. Установлены температурно-концентрационные пределы перехода от одностадийного к двухстадийному режиму самовоспламенения. Многокадровая съемка обнаружила, что в зависимости от температуры «горячая» стадия процесса всегда возникает и развивается вблизи поверхности поршня либо торцевой стенки цилиндра сжатия, сопровождается одновременным переносом образованных очагов внутрь камеры сгорания, после чего происходит близкое к однородному самовоспламенению оставшейся смеси. Фотографии холодного пламени паров н-декана позволили определить пространственное положение очага самовоспламенения первой стадии – вблизи поверхности поршня. Установлено, что вблизи поверхности поршня на оси камеры находится застойная зона, вызванная вихревым тороидальным течением газа, в которой химическая реакция возникает с запозданием. Показано, что по мере увеличения парциального давления паров н-декана при сжатии процесс неравновесной конденсации топлива вблизи стенок камеры сгорания приводит к существенному перераспределению концентрации и температуры смеси по объему, что предопределяет локальные особенности ее последующего самовоспламенения.

**Ключевые слова:** двухстадийное самовоспламенение, н-декан, установка быстрого сжатия, холодное пламя, конденсация, отрицательный температурный коэффициент

**Для цитирования.** Лещевич, В. В. Особенности самовоспламенения паров н-декана в воздухе при температурах 600–800 К / В. В. Лещевич, О. Г. Пенязьков, С. Ю. Шимченко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 747–756. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-747-756>

**Vladimir V. Leschevich, Academician Oleg G. Penyazkov, Sergey Yu. Shimchenko**

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

## SPECIFIC FEATURES OF N-DECANE VAPORS SELF-IGNITION IN AIR AT TEMPERATURES OF 600–800 K

**Abstract.** Experiments of n-decane/air self-ignition at the temperature range 600–800 K were carried out by rapid compression machine. It allowed obtaining temperature-concentration limits of transition from single-stage to two-stage ignition. High-speed video recording has let established that hot stage ignition always initiates near the piston surface or quartz window. These locations depend on gas temperature. Combustion of the test mixture occurs in the entire volume after that. Couple sequential photos of cool flame shows that it starts same near piston surface and has a complicated volumetric structure caused by the roll-up gas vortex. It is shown that partial n-decane pressure increasing during compression causes the non-equilibrium condensation process near the inner surfaces of combustion chamber. This leads to significant redistribution of n-decane concentration and determines local characteristics self-ignition of n-decane/air mixture.

**Keywords:** two-stage ignition, n-decane, rapid compression machine, cool flame, condensation, negative temperature coefficient

**For citation:** Leschevich V. V., Penyazkov O. G., Shimchenko S. Yu. Specific features of n-decane vapors self-ignition in air at temperatures of 600–800 K. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 747–756 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-747-756>

**Введение.** Нормальные алканы  $C_nH_{n+2}$  являются основными компонентами керосина и дизельного топлива. Известно, что более длинные представители данного гомологического ряда легко воспламеняются при повышенных температурах по сравнению с другими классами углеводородов (например, разветвленные алканы, циклоалканы и ароматические соединения) и имеют низкие исследовательские октановые и высокие цетановые числа. Поэтому этот класс углево-

дородов применяется в составе эталонных смесей для определения реакционной способности сложных многокомпонентных топлив. Кроме того, экспериментальные исследования воспламенения простых углеводородов являются ключевым источником данных для построения и верификации детальных кинетических механизмов химических реакций. Теоретико-эмпирические схемы для отдельных углеводородов закладываются в кинетику окисления многокомпонентных суррогатных смесей для описания процессов горения в двигательных и энергетических установках. Одним из основных компонентов суррогатов керосина и дизельного топлива является *n*-декан [1; 2]. При этом существует дефицит экспериментальных данных об интегральном параметре процесса воспламенения – периоде индукции, или задержке самовоспламенения  $\tau_0$  – *n*-декана  $C_{10}H_{22}$  при температурах ниже 1000 К. Из-за низкого значения давления насыщенного пара *n*-декана при комнатной температуре, как правило, большинство экспериментов проводилось на нагреваемых ударных трубах (УТ), обеспечивающих проведение измерений при высоких температурах [3–9]. Только в одной из этих работ [3] измерения периода индукции осуществлялись в широком температурном диапазоне 650–1300 К на ударной трубе со сшитой контактной поверхностью. Приведенные результаты демонстрируют наличие отрицательного температурного коэффициента (ОТК) константы скорости реакции окисления *n*-декана, т. е. с ростом температуры смеси увеличивается ее задержка самовоспламенения  $\tau_0$ . Причины такого поведения в реагирующих системах давно обсуждаются в литературе и объясняются существованием особого режима двухстадийного воспламенения, который заключается в доминировании при низких температурах (до 750 К) промежуточных реакций с участием алкилпероксид-радикала  $C_{10}H_{21}O_2$  [10]. Они сопровождаются возникновением специфического режима горения – «холодного» пламени, имеющего низкоинтенсивное свечение и приводящего к незначительным изменениям температуры, концентрации и состава газовой смеси перед иницированием основной «горячей» стадии горения.

В области низких температур исследование характеристик воспламенения *n*-декана проводится преимущественно на установках быстрого сжатия (УБС). Так, в [11] на УБС квадратного сечения получены результаты по измерению задержки воспламенения паров *n*-декана в воздухе в диапазоне температуры от 600 до 700 К и давлении 0,7 и 1,5 МПа. Температура газа в конце такта сжатия изменялась разбавлением исследуемой смеси диоксидом углерода при постоянной степени сжатия. Как отмечают авторы, полученные результаты дополняют исследование [12], в котором были получены данные по временам индукции бедных и богатых по топливу смесей при температуре 635–770 К и давлении 0,7–3,0 МПа. Состав смеси, для которой установлены задержки самовоспламенения [12], не позволяет непосредственно сопоставить их с измерениями, полученными на УТ.

Воспламенение очень чувствительно к незначительным изменениям локальной температуры горючей смеси и концентрации топлива в ней, поэтому при интерпретации кинетических измерений необходимо учитывать различные факторы, оказывающие влияние на однородность распределения этих параметров в измерительном объеме. Особенно важно выявить закономерности между протекающими физическими процессами при адиабатическом нагреве и самовоспламенением паров *n*-декана в воздухе в диапазоне условий, соответствующих двухстадийному режиму воспламенения смеси. Цель данной работы состояла в исследовании режимов «холодного» и «горячего» воспламенения паров *n*-декана в воздухе в диапазоне температур 600–800 К, эквивалентных отношениях топливо–окислитель ( $\phi$ ) 0,5–1,5 и при давлении 0,8–1,2 МПа, а также в изучении влияния на них неоднородных условий в объеме камеры сгорания.

**Материалы и методы исследования.** Эксперименты проводились на установке быстрого сжатия [13–15]. Такие установки широко используются для получения и проверки данных о кинетике химических реакций при температуре ниже 1000 К.

Динамика роста давления в камере сгорания УБС регистрировалась с помощью прецизионного высокотемпературного пьезоэлектрического датчика давления Kistler 6031U18, с точностью 25 кПа для исследуемого диапазона. Температура сжатого газа рассчитывалась в адиабатическом приближении ( $T_{ad}$ ) на основании измерения начальной температуры смеси и степени сжатия, либо в приближении адиабатического ядра ( $T_c$ ), учитывающего теплотери, на основании измерения начальной температуры и отношения давления в конце такта сжатия к начальному.

Регистрация собственного свечения пламени из объема камеры сгорания, возникающего при химических реакциях, осуществлялась фотоэлектронными умножителями (ФЭУ). Первый из них фиксировал свечение в диапазоне 300–600 нм. Второй был настроен на регистрацию «холодной» стадии воспламенения на одной из наиболее интенсивных полос флюоресценции формальдегида НСОН на длине волны 395,2 нм [16] через узкополосный интерференционный фильтр, пропускающий излучение в интервале  $394 \pm 5$  нм. Третий ФЭУ использовался с узкополосным интерференционным фильтром на длину волны  $\lambda = 431,5 \pm 1,5$  нм. Излучение в данном диапазоне возникает при переходе возбужденного радикала СН из состояния  $2\Delta$  в состояние  $2\Pi$ . Данный радикал является основным промежуточным продуктом в реакциях окисления всех углеводородов, поэтому резкое увеличение его концентрации указывает на начало «горячей» стадии воспламенения.

Фотосъемка воспламенения и горения исследуемых смесей в объеме камеры сгорания при сжатии осуществлялась через кварцевое окно, установленное в торцевой стенке, с помощью высокоскоростной камеры FASTCAM SA-Z со скоростью 67500 кадров в секунду и разрешением  $512 \times 512$  пикселей. Для наблюдения холодного пламени использовалась специальная камера с электронно-оптическим усилителем яркости изображения DI-CAMPro, работающая в режиме двух кадров.

Длительность задержки самовоспламенения  $\tau_0$  определялась по сигналу датчика давления как промежуток времени между моментом максимального давления смеси в ходе сжатия, реализуемого при достижении поршня верхней мертвой точки (ВМТ), и моментом его увеличения на 5 % вследствие самовоспламенения (рис. 1, а). В случае двухстадийного режима измерялись задержки возникновения холодного пламени  $\tau_1$  и время между «холодной» и «горячей» стадиями  $\tau_2$  аналогичным образом.

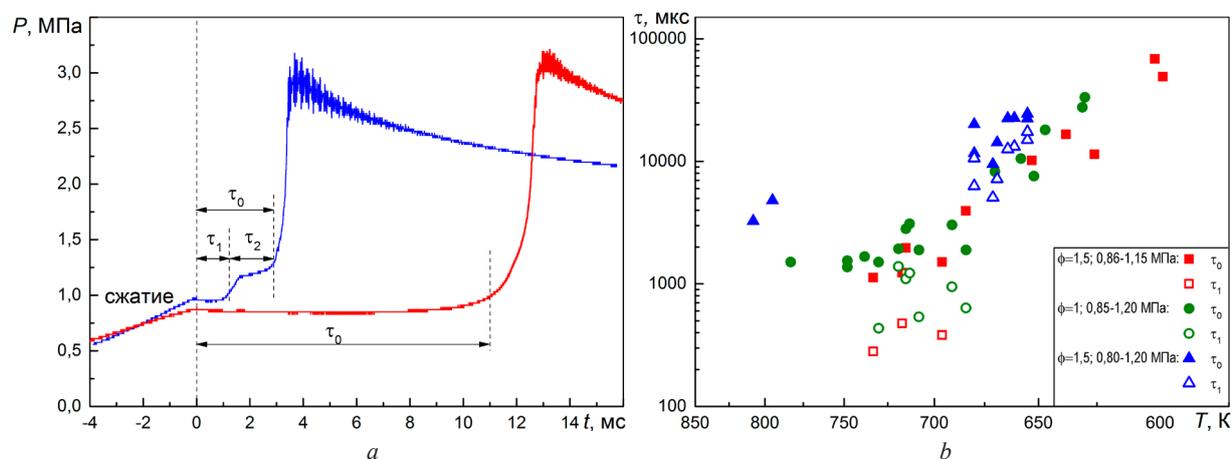


Рис. 1. Динамика давления (а) при одностадийном (красная линия) и двухстадийном (синяя линия) режимах самовоспламенения и измеренные задержки самовоспламенения (б) паров н-декана в воздухе

Fig. 1. Pressure variation (a) during one- (red line) and two-stage (blue line) ignition and measured self-ignition times (b) of n-decane/air mixture

Для максимального снижения влияния процессов адсорбции, разложения и конденсации топлива на точность состава и гомогенность топливовоздушной смеси она приготавливалась непосредственно в цилиндре сжатия УБС, т. е. без ее нахождения в промежуточных испарительных резервуарах и подающих магистралях. Необходимое количество жидкого топлива помещалось с помощью мерной пипетки (цена деления шкалы 0,1 мкл) в виде капли на внутреннюю поверхность камеры сгорания при положении поршня в ВМТ. После этого камера герметично закрывалась в течение не более 10 с и поршень отодвигался в начальное положение. Для достижения необходимого состава в тестовый объем подавался синтетический воздух. В виду низкого давления насыщенного пара н-декана при комнатной температуре (120 Па при 293 К) цилиндр сжатия,

камера сгорания и кварцевое окно нагревались до 333 К, после чего паровоздушная смесь выдерживалась при этой температуре не менее одного часа.

**Результаты и их обсуждение.** Измеренные задержки холодной  $\tau_1$  и горячей  $\tau_0$  стадий самовоспламенения декана показаны на рис. 1,  $b$  в аррениусовских координатах  $\lg t$  от  $1/T$ . По углу наклона прямой, являющейся линейной аппроксимацией данных в представленном масштабе, можно определить энергию активации брутто-реакции.

Анализ полученных результатов для смесей с эквивалентным отношением 0,5; 1 и 1,5 при различных температурах позволил определить диапазон условий, при которых происходит переход от одностадийного «горячего» к двухстадийному режиму воспламенения и построить соответствующую параметрическую диаграмму процесса (рис. 2). Хорошо видно, что богатая по топливу смесь способна самовоспламениться при более низких температурах. Минимальная температура, при которой происходило воспламенение паров  $n$ -декана в воздухе, составила: при  $\phi = 0,5$  – 660 К,  $\phi = 1$  – 630 К и  $\phi = 1,5$  – 605 К. При этом для бедной ( $\phi = 0,5$ ) смеси двухстадийный режим наблюдается во всем диапазоне температур 660–800 К, в то время как для стехиометрической ( $\phi = 1$ ) и богатой ( $\phi = 1,5$ ) смесей он возникает только при температуре выше 710 и 680 К соответственно. При более низких температурах наблюдается только одностадийный режим воспламенения. Кроме того, были определены предельные температуры смеси, при которых воспламенение отсутствовало: для бедной – 630 К, стехиометрической – 600 К и богатой – 580 К. Определение верхней границы перехода от двухстадийного к одностадийному режиму воспламенения на данной установке невозможно без применения разбавителей, так как увеличение температуры достигается только увеличением хода поршня (степени сжатия). Из-за конструктивной ограниченности скорости перемещения поршня существенно увеличивается время сжатия и воспламенение начинается до момента достижения им ВМТ (на сжатии).

Скоростная съемка позволила установить, что «горячая» стадия самовоспламенения паров  $n$ -декана всегда носит очаговый характер и существует определенная закономерность в расположении очагов в зависимости от температуры смеси в конце такта сжатия. На рис. 3 показаны осциллограммы давления и свечения на длине волны 431,5 нм при воспламенении стехиометрической смеси при температурах 720 К ( $a$ ), 713 К ( $b$ ) и 670 К ( $c$ ). С левой стороны рисунка представлены фотографии первичных очагов горения в моменты времени, отмеченные красными вертикальными линиями на графике с осциллограммами. Стоит отметить, что пары фотографий  $a$  и  $c$  получены при положении камеры под углом  $30^\circ$  относительно оси цилиндра сжатия, а пара фотографий  $b$  – вдоль оси; красная штриховая линия соответствует границе между поршнем

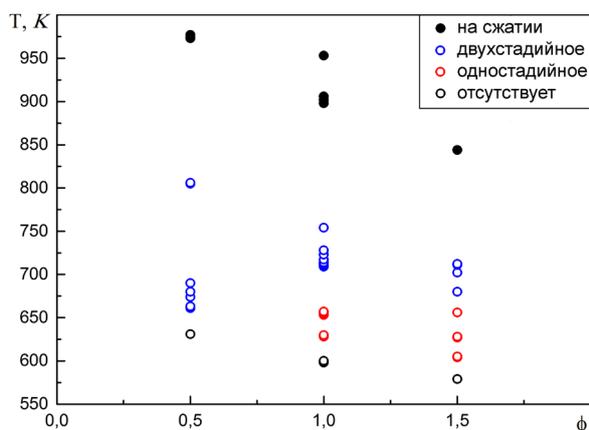


Рис. 2. Параметрическая диаграмма режимов самовоспламенения паров  $n$ -декана в воздухе в зависимости от эквивалентного отношения и температуры

Fig. 2.  $n$ -Decane/air parametric diagram of self-ignition modes depending on the equivalent ratio mixture and temperature

и цилиндрической стенкой камеры сгорания. Обнаружено, что при температурах выше 720 К первичные очаги всегда возникают около поверхности поршня ( $a$ ), в диапазоне 700–720 К возможно одновременное их зарождение как вблизи поршня, так и около кварцевого окна ( $b$ ), а при температурах ниже 700 К воспламенение начинается вблизи поверхности кварцевого окна ( $c$ ). Аналогичное расположение первичных очагов горения зафиксировано в бедной и богатой смесях.

Скоростная съемка показывает, что расширение зоны первичного горения вблизи поршня в радиальном направлении сопровождается одновременным переносом образованных очагов вдоль оси камеры сгорания. Очевидно, что такое поведение обусловлено газодинамической картиной течения, формируемой при движении поршня в виде присоединенного к его поверхности тороидального вихря вблизи стенки ци-

линдра [15]. Это течение приводит к образованию застойной зоны на оси камеры сгорания. В результате в центре объема образуется область, где смесь не воспламеняется, которая имеет вид черной воронки. Периферийное вихревое течение осуществляет захват горячих продуктов и очагов горения от поверхности поршня и обеспечивает их перенос по направлению к торцевой стенке. Расширение зоны горения приводит к дополнительному сжатию несгоревших фрагментов топливной смеси в камере и их дальнейшему объемному самовоспламенению.

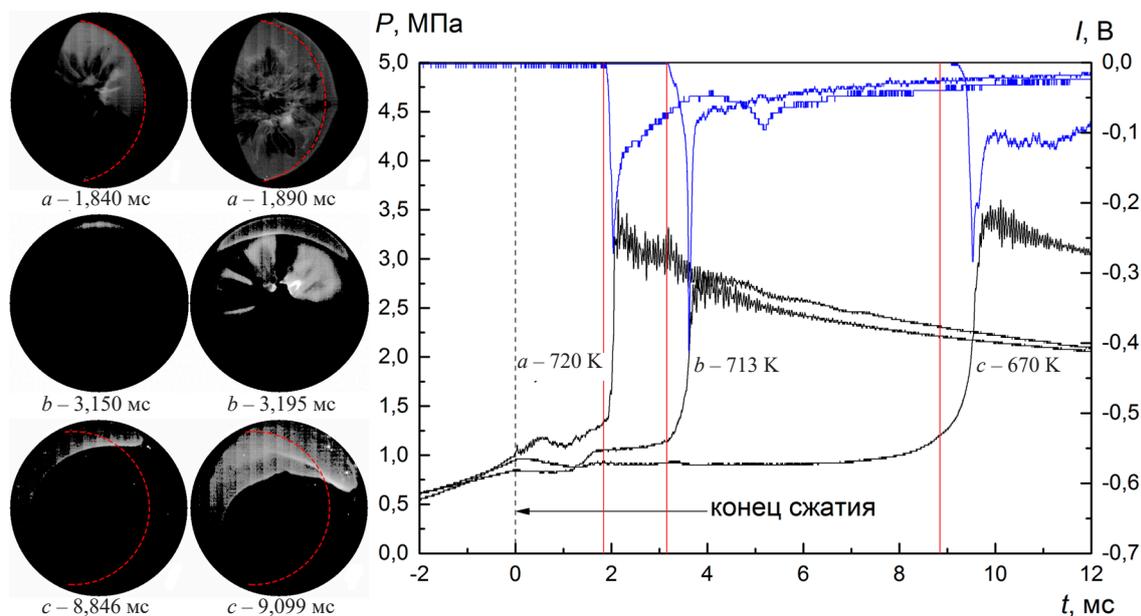


Рис. 3. Динамика давления (черная линия) и свечения на длине волны 431,5 нм (синяя линия), зарегистрированные в экспериментах со стехиометрической смесью при температурах 720 (a), 713 (b) и 670 К (c) вместе с фотографиями очагов горения, где красная штриховая линия – граница между поверхностью поршня и боковой стенкой камеры сгорания

Fig. 3. Pressure variation (black line) and luminescence at wave length 431,5 nm (blue line) recorded in experiments with stoichiometric mixture at temperatures 720 (a), 713 (b) and 670 K (c) together with photos of combustion kernels, where the red dashed line is the border between the piston surface and the combustion chamber sidewall

Представленные кадры (рис. 3) демонстрируют, что в индукционный период не наблюдается эффект возгорания и горения микрочастиц посторонних примесей. В отличие от экспериментов с метаном [13; 17], их зажигание происходит только в продуктах сгорания *n*-декана и фиксируется в виде отдельных ярких точек на фотографиях процесса (рис. 3). По нашему мнению, это вызвано двумя факторами. Минимальная температура возгорания микрочастиц составляет около 850 К [14], что значительно выше минимальной температуры самовоспламенения паров *n*-декана. Второй фактор обусловлен тем, что примесные микрочастицы могут являться центрами конденсации паров топлива по мере роста его парциального давления при сжатии. Образование жидкой пленки на их поверхности и ее последующее испарение предотвращают преждевременный разогрев и возгорание микрочастиц.

Для визуализации режима «холодного» пламени при двухстадийном самовоспламенении использовалась камера с электронно-оптическим усилителем яркости изображения DI-CAM Pro, установленная под углом 30° относительно оси цилиндра сжатия. Регистрация изображений осуществлялась в режиме двух кадров: экспозиция каждого кадра – 10 мкс, интервал времени между ними – 150 мкс. Синхронизация запуска камеры осуществлялась по первому пику интенсивности свечения в наиболее чувствительном диапазоне 300–600 нм. На представленных фотографиях (рис. 4) видно, что зарождение очага холодного пламени также происходит вблизи поршня. Как и для «горячей» стадии (рис. 3) характерной особенностью полученных снимков является наличие области с не реагирующей смесью в застойной зоне на оси вблизи поверхности поршня, имеющей вид черной воронки. Это указывает на влияние вихревого течения на распре-

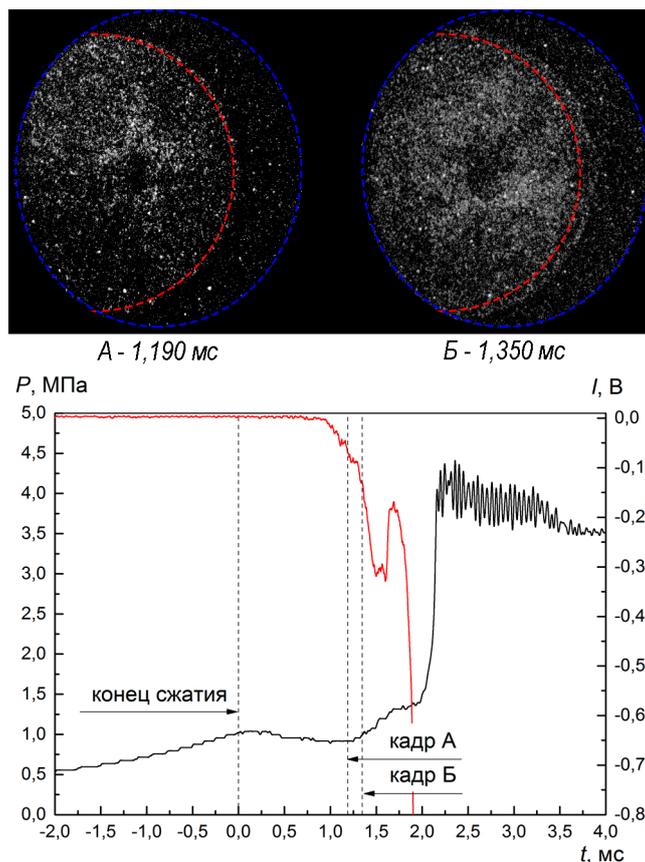


Рис. 4. Кадры с изображением холодного пламени (экспозиция кадра 10 мкс, интервал 150 мкс), где красная штриховая линия – граница между поверхностью поршня и боковой стенкой камеры сгорания, синяя штриховая – граница между боковой стенкой камеры сгорания и внутренней поверхностью кварцевого окна, представленные вместе с давлением (черная линия) и свечением в диапазоне 300–600 нм (красная линия) при самовоспламенении декановоздушной смеси ( $p_c = 1,04$  МПа,  $T_c = 715$  К и  $\phi = 1,5$ )

Fig. 4. Frames with the cool flame image (frame exposure 10  $\mu$ s, interval 150  $\mu$ s), where the red dashed line is the border between the piston surface and the combustion chamber sidewall, the blue dashed line is the border between the combustion chamber sidewall and the inner surface of quartz window, presented together with pressure (black line) and luminescence in the range of 300–600 nm (red line) in decane/air mixture self-ignition ( $p_c = 1.04$  МПа,  $T_c = 715$  К and  $\phi = 1.5$ )

деление температуры и концентрации топлива и температуры смеси в объеме камеры сгорания, и последующие процессы инициирования как «холодной», так и «горячей» стадий воспламенения паров *n*-декана.

Характерное время задержки самовоспламенения  $\tau_0$  *n*-декана в исследованном диапазоне условий составляет 1–70 мс, а время сжатия смеси 30–60 мс. Очевидно, что за этот период массивные металлические стенки камеры сгорания не успевают нагреться и остаются при начальной температуре установки около 333 К, в то время как температура газа в момент прихода поршня в верхнюю мертвую точку (ВМТ) может достигать значения 1000 К. При этом отношение парциального давления паров *n*-декана к давлению его насыщенного пара, или степень пересыщения  $\alpha$ , при температуре стенки 333 К достигает значений от 4 до 14 в зависимости от эквивалентного отношения смеси. Таким образом, в определенный момент сжатия вблизи поверхностей камеры сгорания возникает состояние, при котором иницируется процесс неравновесной гомогенной конденсации паров *n*-декана с образованием микрокапель. Конденсация топлива может вызывать как дополнительный локальный рост температуры в окрестности микрокапель за счет скрытой теплоты фазового перехода, так и последующее охлаждение за счет их испарения при контакте с нагретым воздухом. Одновременно, возможно образование тонкой пленки жидкости на стенках цилиндра сжатия. При этом происходит постоянный транспорт паров из внутреннего

объема камеры сгорания к поверхности поршня и торцевой стенке за счет сформированного торoidalного течения в объеме [15]. О протекании процесса конденсации паров н-декана при движении поршня свидетельствует тот факт, что измеренное давление  $p_c$  в конце такта сжатия всегда больше, чем максимально возможное, рассчитанное в адиабатическом приближении процесса сжатия  $p_{ad}$ . Это несоответствие вызвано уменьшением удельной теплоемкости смеси и, как следствие, увеличением показателя адиабаты смеси  $\gamma$  из-за уменьшения концентрации паров н-декана в камере сгорания. В серии тестовых экспериментов по сжатию воздуха было установлено, что рассчитанное адиабатическое давление всегда больше измеренного на  $3 \pm 1 \%$ . Такой уровень теплотеря применим и для топливовоздушной смеси, где молярное содержание паров н-декана не превышало 2 %. Это позволяет провести корректировку значения средней температуры смеси  $T_{eff}$  путем подбора «эффективного» состава, при котором выполняется превышение рассчитанного значения давления  $p_{ad}$  на 3 %, по сравнению с измеренным в эксперименте  $p_c$ .

На рис. 5 представлены результаты измерений задержки самовоспламенения бедной ( $\phi = 0,5$ ), стехиометрической ( $\phi = 1$ ) и богатой ( $\phi = 1,5$ ) смесей паров н-декана с воздухом при температурах от 600 до 800 К, давлении 0,8–1,2 МПа и постоянной плотности  $5 \pm 0,5 \text{ кг/м}^3$ . Некоторые данные, полученные на ударных трубах, приведены на рисунке для сравнения. Заполненными символами, которые относятся к полученным в данной работе результатам, приведены значения средней температуры  $T_c$  смеси в приближении адиабатического ядра, а пустыми – скорректированная температура  $T_{eff}$  рассчитанная с учетом изменения состава из-за конденсации паров н-декана. Видно, что процесс конденсации топлива может привести к существенному увеличению средней температуры в объеме на 100 К в богатых смесях, а в бедных – на 15–25 К. Рассчитанное изменение средней температуры приводит к сдвигу измеренных задержек самовоспламенения в сторону линейной интерполяции данных, полученных на ударной трубе при высоких температурах. Отметим, что локальные и средние изменения температуры смеси могут быть и выше, поскольку мы не учитывали влияние скрытой теплоты фазового перехода на нагрев оставшегося газа в объеме камеры сгорания. Наблюдаемый в повторных экспериментах разброс результатов измерений может быть вызван изменениями локальной температуры и эквивалентного отношения  $\phi$  вследствие сложного характера протекания процесса конденсации и последующего перераспределения концентраций топлива.

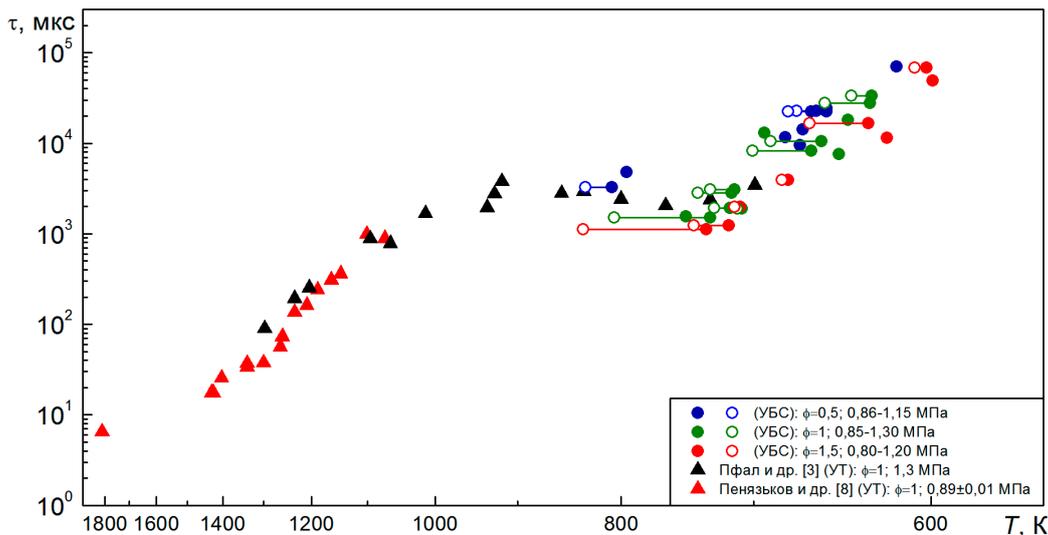


Рис. 5. Сравнение измеренных значений задержки самовоспламенения смеси н-декан–воздух в зависимости от рассчитанной температуры в приближении адиабатического ядра  $T_c$  (заполненные символы) и с учетом конденсации топлива  $T_{eff}$  (пустые символы) с результатами, полученными на УТ

Fig. 5. Comparison of decane/air self-ignition delay depending on the calculated temperature: in the approximation of the adiabatic core  $T_c$  (filled symbols) and taking into account fuel condensation  $T_{eff}$  (empty symbols), with the results obtained in a shock tube

Таким образом, из-за явлений конденсации и присутствующего вихревого течения в объеме камеры сгорания возникает эффект локального обогащения смеси топливом вблизи поверхности поршня и торца камеры сгорания. Кинетически более богатые смеси тяжелых углеводородов, к которым относится *n*-декан, воспламеняются раньше при тех же термодинамических условиях, а за счет скрытой теплоты фазового перехода локальная температура в этом слое топливоздушской смеси может быть и выше. Это приводит к тому, что как «холодная», так и «горячая» стадии воспламенения инициируются быстрее и могут протекать более интенсивно вблизи поверхности поршня и торца камеры сгорания (рис. 3, 4). Эти эффекты объясняют измеряемое в экспериментах уменьшение задержки самовоспламенения и возникновения очагов горения вблизи поверхностей камеры сгорания и могут стать ключевым аспектом для понимания наблюдаемых явлений низкотемпературного горения в камерах сгорания.

Анализ литературных данных [3–9; 11; 12] показывает, что эффект влияния конденсации паров при сжатии на изменение как средней, так и локальной температуры и концентрации смеси в экспериментальных установках не учитывался ранее. На рис. 6 приведена зависимость степени пересыщения  $\alpha$  паров *n*-декана от эквивалентного отношения смеси  $\phi$  в конечном состоянии, рассчитанная по литературным данным различных авторов на ударных трубах и установках быстрого сжатия. Хорошо видно, что большинство экспериментальных измерений проводилось в условиях пересыщенного состояния паров *n*-декана. Только в некоторых работах [5; 9] измерения задержек самовоспламенения проводились при  $\alpha < 1$ , что связано с низкими концентрациями топлива и давлением смеси.

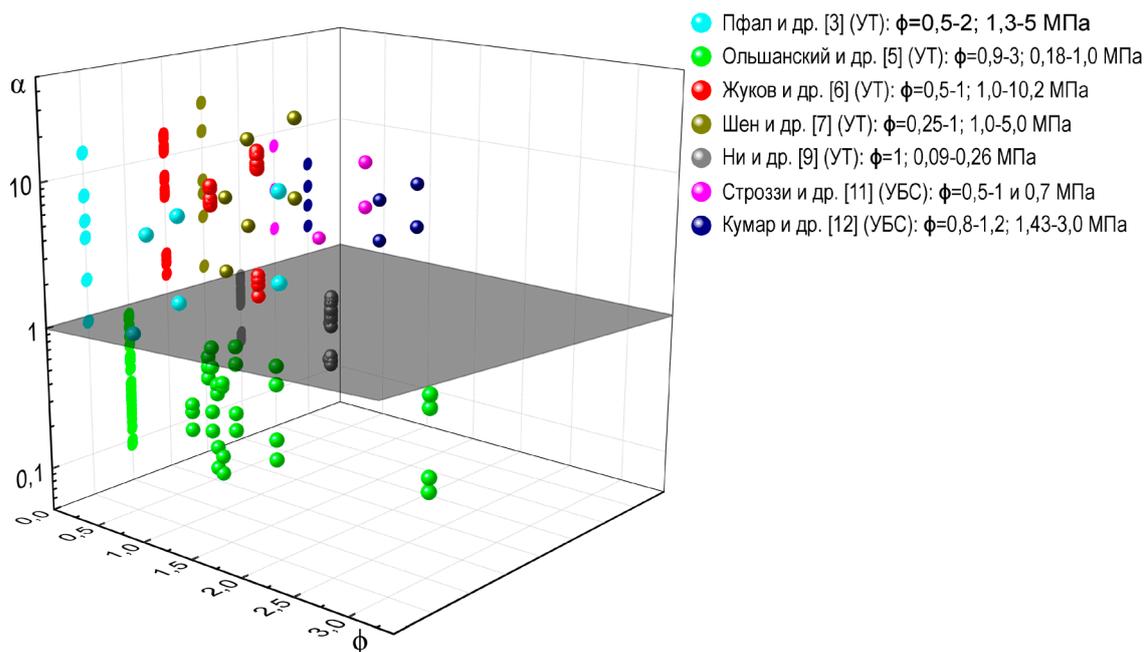


Рис. 6. Сравнение значений степени пересыщения  $\alpha$  и эквивалентного отношения  $\phi$  в экспериментах, представленных в литературе

Fig. 6. Value comparison of oversaturation  $\alpha$  and equivalent ratio  $\phi$  in experiments given in the literature

**Заключение.** Экспериментально определены задержки «холодной» и «горячей» стадий самовоспламенения в бедной ( $\phi = 0,5$ ), стехиометрической ( $\phi = 1$ ) и богатой ( $\phi = 1,5$ ) смесях паров *n*-декана с воздухом в диапазоне температур  $T_c$  600–800 К и давлений 0,8–1,2 МПа, которые хорошо согласуются с литературными данными. На основании массива экспериментальных измерений установлена параметрическая диаграмма условий возникновения режимов одностадийного и двухстадийного самовоспламенения паров *n*-декана. Для стехиометрического и богатого состава предельные температуры перехода от одностадийного «горячего» к двухстадийному ре-

жиму составили 710 и 680 К соответственно. Для бедной смеси двухстадийный режим реализовывался во всем исследуемом температурном диапазоне – 660–800 К. Получены данные по пространственной локализации очагов горячего воспламенения при  $\phi = 1$  от температуры: ниже 700 К – вблизи кварцевого окна, выше 720 К – вблизи поверхности поршня, при 700–720 К – вблизи обеих поверхностей. Зафиксированные особенности протекания воспламенения и горения испаренного *n*-декана связаны с наличием тороидального вихревого движения над поверхностью сжимающего поршня, обеспечивающего транспорт паров, а также процессом их конденсации в тепловом пограничном слое, где отношение парциального давления может быть в 4–14 раз больше давления насыщенного пара *n*-декана при начальной температуре стенок 333 К в зависимости от эквивалентного отношения топливо–окислитель. Возникающее неоднородное распределение концентрации топлива и температуры смеси по объему приводит к очаговому самовоспламенению в камере сгорания. Влияние этих явлений на пространственно-временные характеристики процесса самовоспламенения указывает на необходимость тщательного анализа фактических условий проведения экспериментальных измерений времени индукции паров углеводородов при использовании этих данных для верификации детальных кинетических схем химических реакций.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках ГПНИ «Энергетические системы, процессы и технологии» подпрограмма «Эффективные теплофизические процессы и технологии» (задание № 2.59).

**Acknowledgements.** The study was conducted in the frame of the Government Program “Energy Systems, Processes and Technologies” subprogramme “Effective Thermophysical Processes and Technologies” (task no. 2.59).

#### Список использованных источников

1. Experimental formulation and kinetic model for JP-8 surrogate mixtures / A. Violi [et al.] // *Combustion Science and Technology*. – 2002. – Vol. 174, N 11–12. – P. 399–417. <https://doi.org/10.1080/00102200215080>
2. Edwards, T. Surrogate Mixtures to Represent Complex Aviation and Rocket Fuels / T. Edwards, L. Q. Maurice // *Journal of Propulsion and Power*. – 2001. – Vol. 17, N 2. – P. 461–466. <https://doi.org/10.2514/2.5765>
3. Pfahl, U. Self-ignition of diesel-relevant hydrocarbon-air mixtures under engine conditions / U. Pfahl, K. Fieweger, G. Adomeit // *Symposium (International) on Combustion*. – 1996. – Vol. 26, N 1. – P. 781–789. [https://doi.org/10.1016/s0082-0784\(96\)80287-6](https://doi.org/10.1016/s0082-0784(96)80287-6)
4. Horning, D. C. A study of the high-temperature auto-ignition and thermal decomposition of hydrocarbons: Report No. TSD-135 [Electronic resource] / D. C. Horning. – 2001. – 148 p. – Mode of access: [https://hanson.stanford.edu/dissertations/Horning\\_2001.pdf](https://hanson.stanford.edu/dissertations/Horning_2001.pdf). – Date of access: 24.09.2020.
5. Olchanski, E. Decane oxidation in a shock tube / E. Olchanski, A. Burcat // *International Journal of Chemical Kinetics*. – 2006. – Vol. 38, N 12. – P. 703–713. <https://doi.org/10.1002/kin.20204>
6. Zhukov, V. P. Autoignition of *n*-decane at high pressure / V. P. Zhukov, V. A. Sechenov, A. Yu. Starikovskii // *Combustion and Flame*. – 2008. – Vol. 153, N 1–2. – P. 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2007.09.006>
7. A shock tube study of the ignition of *n*-heptane, *n*-decane, *n*-dodecane, and *n*-tetradecane at elevated pressures / H. P. S. Shen [et al.] // *Energy & Fuels*. – 2009. – Vol. 23, N 5. – P. 2482–2489. <https://doi.org/10.1021/ef8011036>
8. Autoignition of surrogate fuels at elevated temperatures and pressures / A. J. Dean [et al.] // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2007. – Vol. 31, N 2. – P. 2481–2488. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.162>
9. Shock tube study of *n*-decane ignition at low pressures / X. F. Nie [et al.] // *Acta Mechanica Sinica*. – 2012. – Vol. 28, N 1. – P. 79–82. <https://doi.org/10.1007/s10409-011-0542-9>
10. Титова, Н. С. О кинетических механизмах окисления *n*-декана / Н. С. Титова, С. А. Торехов, А. М. Старик // *Физика горения и взрыва*. – 2011. – Т. 47, № 2. – С. 3–22.
11. Autoignition of *n*-decane and multi-component surrogates of kerosene in an optical Rapid Compression Machine / C. Strozzi [et al.] // *Proc. 27th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*. – Beijing, 2019. – P. 1–6.
12. Kumar, K. Autoignition of *n*-decane under elevated pressure and low-to-intermediate temperature conditions / K. Kumar, G. Mittal, C. J. Sung // *Combustion and Flame*. – 2009. – Vol. 156, N 6. – P. 1278–1288. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.01.009>
13. Auto-ignitions of a methane/air mixture at high and intermediate temperatures / V. V. Leschevich [et al.] // *Shock Waves*. – 2016. – Vol. 26, N 5. – P. 657–672. <https://doi.org/10.1007/s00193-016-0665-9>
14. Лещевич, В. В. Возгорание микрочастиц угля в атмосфере воздуха и их влияние на воспламенение метана / В. В. Лещевич, О. Г. Пенязьков, С. Ю. Шимченко // *Инж.-физ. журн.* – 2020. – Т. 93, № 4. – С. 1041–1050.
15. Visualization and analysis of the burning particles motion in combustion chamber of a rapid compression machine / V. V. Leschevich [et al.] // *Journal of Flow Visualization and Image Processing*. – 2016. – Vol. 23, N 1–2. – P. 1–14. <https://doi.org/10.1615/jflowvisimageproc.2016019010>
16. Гейдон, А. Г. Спектроскопия пламен / А. Г. Гейдон, И. В. Вейц, Л. В. Гурвич. – М., 1959. – 382 с.

17. Doroshko, M. V. High-temperature pyrolysis of propane and methane – the shock tube investigation / M. V. Doroshko // *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*. – 2019. – Vol. 23, N 2. – P. 165–179. <https://doi.org/10.1615/hightempmatproc.2019030409>

## References

1. Violi A., Yan S., Eddings E. G., Sarofim A. F., Granata S., Faravelli T., Ranzi E. Experimental formulation and kinetic model for JP-8 surrogate mixtures. *Combustion Science and Technology*, 2002, vol. 174, no. 11–12, pp. 399–417. <https://doi.org/10.1080/00102200215080>
2. Edwards T., Maurice L. Q. Surrogate Mixtures to Represent Complex Aviation and Rocket Fuels. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, vol. 17, no. 2, pp. 461–466. <https://doi.org/10.2514/2.5765>
3. Pfahl U., Fieweger K., Adomeit G. Self-ignition of diesel-relevant hydrocarbon-air mixtures under engine conditions. *Symposium (International) on Combustion*, 1996, vol. 26, no. 1, pp. 781–789. [https://doi.org/10.1016/s0082-0784\(96\)80287-6](https://doi.org/10.1016/s0082-0784(96)80287-6)
4. Horning D. C. *A study of the high-temperature auto-ignition and thermal decomposition of hydrocarbons. Report No. TSD-135*. 2001, 148 p. Available at: [https://hanson.stanford.edu/dissertations/Horning\\_2001.pdf](https://hanson.stanford.edu/dissertations/Horning_2001.pdf) (accessed 24 September 2020).
5. Olchanski E., Burcat A. Decane oxidation in a shock tube. *International Journal of Chemical Kinetics*, 2006, vol. 38, no. 12, pp. 703–713. <https://doi.org/10.1002/kin.20204>
6. Zhukov V. P., Sechenov V. A., Starikovskii A. Yu. Autoignition of n-decane at high pressure. *Combustion and Flame*, 2008, vol. 153, no. 1–2, pp. 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2007.09.006>
7. Shen H. P. S., Steinberg J., Vanderover J., Oehlschlaeger M. A. A shock tube study of the ignition of n-heptane, n-decane, n-dodecane, and n-tetradecane at elevated pressures. *Energy & Fuels*, 2009, vol. 23, no. 5, pp. 2482–2489. <https://doi.org/10.1021/ef80110136>
8. Dean A. J., Penyazkov O. G., Sevruk K. L., Varatharajan B. Autoignition of surrogate fuels at elevated temperatures and pressures. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, vol. 31, no. 2, pp. 2481–2488. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.162>
9. Nie X. F., Li P., Zhang C. H., Xie W., Li C. S., Li X. Y. Shock tube study of n-decane ignition at low pressures. *Acta Mechanica Sinica*, 2012, vol. 28, no. 1, pp. 79–82. <https://doi.org/10.1007/s10409-011-0542-9>
10. Titova N. S., Torokhov S. A., Starik A. M. On kinetic mechanisms of n-decane oxidation. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2011, vol. 47, no. 2, pp. 129–146. <https://doi.org/10.1134/s0010508211020018>
11. Strozzi C., Ossman H., Tsuzuki K., Sotton J., Bellenoue M. Autoignition of n-decane and multi-component surrogates of kerosene in an optical Rapid Compression Machine. *Proceedings of 27th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*. Beijing, 2019, pp. 1–6.
12. Kumar K., Mittal G., Sung C. J. Autoignition of n-decane under elevated pressure and low-to-intermediate temperature conditions. *Combustion and Flame*, 2009, vol. 156, no. 6, pp. 1278–1288. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.01.009>
13. Leschevich V. V., Martynenko V. V., Penyazkov O. G., Sevrouk K. L., Shabunya S. I. Auto-ignitions of a methane/air mixture at high and intermediate temperatures. *Shock Waves*, 2016, vol. 26, no. 5, pp. 657–672. <https://doi.org/10.1007/s00193-016-0665-9>
14. Leschevich V. V., Penyazkov O. G., Shimchenko S. Yu. Ignition of Coal Microparticles in an Air Atmosphere and Their Influence on the Inflammation of Methane. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2020, vol. 93, no. 4, pp. 1004–1014. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02201-9>
15. Leschevich V. V., Penyazkov O. G., Fomin N. A., Shimchenko S. Yu. Visualization and analysis of the burning particles motion in combustion chamber of a rapid compression machine. *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 2016, vol. 23, no. 1–2, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1615/jflowvisimageproc.2016019010>
16. Gaydon A. G. *The spectroscopy of flames*. London, 1957. 279 p.
17. Doroshko M. V. High-temperature pyrolysis of propane and methane – the shock tube investigation. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*, 2019, vol. 23, no. 2, pp. 165–179. <https://doi.org/10.1615/hightempmatproc.2019030409>

## Информация об авторах

Лещевич Владимир Владимирович – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [v.leschevich@dnpiitmo.by](mailto:v.leschevich@dnpiitmo.by)

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

Шимченко Сергей Юрьевич – науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [sergey.shimchenko@gmail.com](mailto:sergey.shimchenko@gmail.com)

## Information about the authors

Leschevich Vladimir V. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [v.leschevich@dnpiitmo.by](mailto:v.leschevich@dnpiitmo.by)

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

Shimchenko Sergey Yu. – Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [sergey.shimchenko@gmail.com](mailto:sergey.shimchenko@gmail.com)

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

**АГРАРНЫЕ НАУКИ**  
**AGRARIAN SCIENCES**

УДК 636.4.082.12  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-757-768>

Поступило в редакцию 23.10.2020  
Received 23.10.2020

**Академик И. П. Шейко<sup>1</sup>, Т. Н. Тимошенко<sup>1</sup>, Н. В. Приступа<sup>1</sup>, Е. А. Янович<sup>1</sup>, В. Н. Заяц<sup>1</sup>,  
член-корреспондент Р. И. Шейко<sup>2</sup>, И. Н. Казаровец<sup>1</sup>, А. Ч. Бурнос<sup>1</sup>, И. С. Коско<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству,  
Жодино, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**НОВЫЕ СЕЛЕКЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
В СВИНОВОДСТВЕ БЕЛАРУСИ**

**Аннотация.** В организации систем разведения и гибридизации свиноводства Беларуси задействовано шесть пород свиней: белорусская крупная белая, белорусская мясная, белорусская черно-пестрая, ландрас, йоркшир и дюрок. Более 85 % свиней, поставляемых на мясокомбинаты республики, получают от различных сочетаний межпородной гибридизации.

Для эффективного развития отрасли в республике РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству» сформирована система селекционно-племенной работы в свиноводстве, направленная на создание новых конкурентоспособных пород, типов и гибридов свиней, адаптированных к условиям промышленного производства и не уступающих по продуктивности аналогам мировой селекции.

Главным звеном этой системы выступают плезаводы первого порядка (нуклеусы) как предприятия нового типа, занимающиеся селекцией и разведением лучших животных с выдающимися генетически обусловленными племенными и продуктивными качествами. Вторым звеном данной системы являются племрепродукторы первого порядка, которые комплектуются высокоценными племенными свинками из ведущего «нуклеуса» и занимаются их размножением по получению свинок GP (прародители).

Оценивая уровень технологического развития свиноводства в Беларуси на период до 2030 года, мы рассчитали индексы на все прогнозируемые годы (2020–2030 гг.) Существующий уровень технологического развития отрасли свиноводства в Беларуси оценивается как средний. В 2020–2021 гг. будет осуществлен переход свиноводства на умеренно-высокий, в 2022–2023 гг. – на высокий, а с 2025–2030 гг. – на интенсивный уровень технологического развития.

**Ключевые слова:** свиноводство, свиноматки, племенной молодняк, репродуктивные, откормочные и мясные качества, кормление, прогноз технологического развития отрасли

**Для цитирования.** Новые селекционно-генетические методы в свиноводстве Беларуси / И. П. Шейко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 757–768. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-757-768>

**Academician Ivan P. Sheyko<sup>1</sup>, Tatyana N. Timoshenko<sup>1</sup>, Natalya V. Pristupa<sup>1</sup>, Elena A. Yanovich<sup>1</sup>,  
Vladimir N. Zayats<sup>1</sup>, Corresponding Member Ruslan I. Sheyko<sup>2</sup>, Irina N. Kazarovets<sup>1</sup>,  
Anton Ch. Burnos<sup>1</sup>, Ivan S. Kosko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry,  
Zhodino, Republic of Belarus*

<sup>2</sup>*Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

**NEW BREEDING AND GENETIC METHODS IN PIG BREEDING IN BELARUS**

**Abstract.** Six pig breeds: Belarusian large white, Belarusian meat, Belarusian black and white, landrace, Yorkshire and Duroc are involved in breeding and hybridization of pig breeding in Belarus. More than 85 % of pigs supplied to meat processing plants of the Republic are provided by different combinations of interbreed hybridization.

For the effective development of this branch in the Republic, the Scientific-Practical Center on Animal Husbandry of the National Academy of Sciences of Belarus organized the system of selection and breeding work in pig breeding directed to create new competitive breeds, types, and hybrids of pigs adapted to the industrial production conditions and not inferior to the productivity of the analogs of the world selection.

The main link of this system is the first-order breeding plants (nucleus units) as new-type plants dealing with the selection and breeding of the best animals with the outstanding genetically conditioned breeding and productive qualities. The second link of this system is the first-order breeding breeders that are completed with high-valuable breeding pigs from the leading nucleus unit and are engaged in their reproduction to obtain grandparents (GP).

Assessing the level of the technological development of pig breeding in Belarus during the period to the 2030 year, we predicted the indices for the all predictable years (2020–2030). The existing level of the technological development of the pig breeding branch is assessed as the mean one. During 2020–2021 the pig breeding level will be moderate-high, during 2022–2023 – high, and since 2025–2030 – intensive.

**Keywords:** pig breeding, sows, pedigree young animals, reproductive, fattening and meat qualities, feeding, forecast of the technological development of the industry

**For citation:** Sheyko I. P., Timoshenko T. N., Pristupa N. V., Yanovich E. A., Zayats V. N., Sheyko R. I., Kazarovets I. N., Burnos A. Ch., Kosko I. S. New breeding and genetic methods in pig breeding in Belarus. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 757–768 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-757-768>

**Введение.** Обеспечение населения мясом – сложная проблема мировой экономики и политики. В решении мясной проблемы производству свинины отводится решающая роль. Мировое производство ее ежегодно возрастает на 2,5–3,0 %. В структуре производства свинина занимает первое место (40 %). В Республике Беларусь в мясном балансе доля свинины составляет также около 37–38 % [1; 2]. Такая тенденция связана прежде всего с тем, что свиноводство лучше других отраслей животноводства приспособлено к специализации и концентрации производства, высокому уровню механизации, обеспечивая более низкие затраты кормов и других материально-технических средств на производство продукции и быструю оборачиваемость капитальных вложений. Следовательно, дальнейшее развитие отрасли свиноводства в республике должно быть приоритетным.

Беларусь в отличие от стран Западной Европы в технологии производства свинины имеет свои особенности, заключающиеся в высокой концентрации поголовья свиней на ограниченной территории. Поэтому и система разведения, и животные должны соответствовать жестким технологическим требованиям, быть высокопродуктивными, отличаться хорошей адаптационной способностью и устойчивостью к заболеваниям [3–5].

На первых этапах перевода отрасли на промышленную основу белорусская система, основанная на технологии производства свинины по принципу: племзавод–селекционно-гибридный центр–промышленный комплекс, сработала достаточно успешно. Белорусские породы свиней – крупная белая, белорусская черно-пестрая и белорусская мясная отличились крепостью конституции, хорошей адаптационной способностью к условиям промышленных технологий, неплохими репродуктивными и откормочными качествами, а также высокими вкусовыми качествами мяса и сала. Хотя свиньи белорусских пород несколько уступали импортным породам по показателям мясности туш [6–8].

В настоящее время в организации систем разведения и гибридизации задействовано шесть пород свиней: белорусская крупная белая, белорусская мясная, белорусская черно-пестрая, ландрас, йоркшир и дюрок. Более 85 % свиней, поставляемых на мясокомбинаты в республике, получают от различных сочетаний межпородной гибридизации. При этом работа с породами свиней осуществляется постоянно. В республике селекционный процесс по совершенствованию существующих и созданию новых пород, типов и линий осуществляется непрерывно, несмотря на большие трудоемкость и затраты. Чтобы животные соответствовали требованиям современного рынка, необходимо создание новых, более высокопродуктивных структурных единиц в породах [3; 9; 10].

При этом, учитывая, что апробированные в последние годы высокопродуктивные генотипы свиней выведены на принципах новой современной теории породообразования, совершенствование и создание новых селекционных стад и заводских линий проводится на радикальной реконструкции имеющегося генофонда с широким привлечением лучшего в мире селекционного материала. При этом осуществляется моделирование проектного генотипа с желательными качествами и уровнем продуктивности животных, а также систематически проводятся сравни-

тельные испытания на сочетаемость животных создаваемых пород, типов и линий при разведении «в себе», а также при различных методах скрещивания и гибридизации [11; 12].

Использование традиционных методов селекции не обеспечивает необходимых темпов роста производства животноводческой продукции. Вовлечение в число селекционируемых признаков ряда генетических тестов и параметров животных значительно ускоряет селекционный процесс и повышает эффективность дальнейшей работы. В связи с этим необходимы разработка и использование, при создании новых заводских линий и типов, более совершенных методов селекции, которые позволили бы эффективно осуществлять работу по качественному улучшению существующих и созданию новых генотипов свиней.

Решение этих задач возможно при использовании методов геномной селекции, позволяющих идентифицировать гены, напрямую или косвенно связанные с хозяйственно полезными признаками, т. е. проводить уточняющую селекцию по генотипу, непосредственно на уровне ДНК. Селекция по генотипу не учитывает влияния модификационной изменчивости на проявление признаков продуктивности, делает возможным оценку животных в раннем возрасте независимо от пола, что в конечном итоге повышает эффективность селекционной работы, способствует идентификации и быстрому введению предпочтительных аллелей из ресурсных популяций в популяции реципиентов с целью повышения продуктивности и устойчивости к заболеваниям улучшаемых пород животных. Поэтому, чтобы избежать иностранной экспансии не только в экономике, но и в науке, необходимо интенсивное внедрение биотехнологий, в т. ч. и ДНК-технологий в производственную практику [13].

Применение генетических маркеров является перспективным направлением, обусловлено процессом совершенствования генетического потенциала отечественных пород, однако требует дифференцированного подхода в зависимости от породной принадлежности, генетической структуры популяции и конкретной селекционной задачи.

Доказано, что внедрение в селекционную практику маркерных генов позволяет увеличить многоплодие маток в среднем на 11 % и более, снизить удельный вес мертворожденных поросят до 2,5 %, а аварийных опоросов – до 3,4 %, повысить сохранность поросят к отъему на 10 %, откормочную и мясную продуктивность на 5–10 %, создать резистентные к стрессу стада свиней [14].

**Результаты и их обсуждение.** Для дальнейшего развития свиноводства в Беларуси необходимо в кратчайшие сроки восстановить поголовье свиней к уровню 2013 г. К 2025 г. обеспечить производство не менее 600 тыс. т свинины с поэтапным проведением реконструкции, модернизации и техническим перевооружением имеющихся площадей. Ускорить дальнейшее наращивание производства за счет увеличения продуктивности животных и оборота производственных помещений. При этом основная проблема в развитии отрасли на ближайшую перспективу заключается в обеспечении биологической защиты животных.

Главным и определяющим условием выполнения мероприятий по восстановлению производства свинины является обеспечение полнорационными комбикормами всех половозрастных групп.

Для эффективного развития отрасли в республике РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству» сформирована система селекционно-племенной работы в свиноводстве, направленная на создание новых конкурентоспособных пород, типов и гибридов свиней, адаптированных к условиям промышленного производства и не уступающих по продуктивности аналогам мировой селекции.

Главным звеном этой системы выступают племазаводы первого порядка (нуклеусы) как предприятия нового типа, занимающиеся селекцией и разведением лучших животных с выдающимися генетически обусловленными племенными и продуктивными качествами.

Вторым звеном данной системы являются племрепродукторы первого порядка, которые комплектуются высокоценными племенными свинками из ведущего «нуклеуса» и занимаются их размножением по получению свинок GP (прародители).

Сущность новой системы в свиноводстве сводится к необходимости создания достаточного количества нуклеусов (племазаводов первого порядка) по разведению генетически неродственных пород и типов высокопродуктивных животных, отселекционированных отдельно по воспроизводительным, мясным и откормочным качествам.

В нуклеусах предусмотрена углубленная селекционная работа, направленная на быстрое повышение из поколения в поколение селекционируемых признаков продуктивности и консолидацию стад по генотипу и фенотипу, а также на хорошую сочетаемость животных этих пород и типов в скрещивании между собой, на размножение в селекционно-гибридных центрах во вновь строящихся и существующих племрепродукторах и племенных фермах промышленных комплексов высокоценных генотипов из нуклеусов, получение животных прародительских и родительских форм для промышленных комплексов на межлинейной и породно-линейной основе. Гибридные свинки реализуются в товарные хозяйства для последующего скрещивания с хряками других пород и сочетаний.

В приоритете также широкое применение в промышленных комплексах породно-линейной гибридизации, основанной на интенсивном использовании отселекционированных на сочетаемость йоркшир, лагдрас, крупной белой, белорусской мясной, белорусской чернопестрой пород, дюрок и пьетрен, позволяющей значительно повысить уровень проявления эффекта гетерозиса и обеспечение через станции искусственного осеменения спермой хряков прародительских и родительских форм племрепродукторов и промышленных комплексов. Разработанная система включает поставку племенных свинок в племрепродукторы первого порядка из других хозяйств, в том числе из-за рубежа. Однако следует отметить, что выполнение селекционной программы в новой системе является решением части проблем, стоящих перед белорусским свиноводством. Как показывает опыт отдельных, успешно работающих хозяйств с импортным поголовьем свиней необходим комплексный подход в использовании современных технологий кормления и содержания животных, а также к программному управлению технологическим производством в племенных и промышленных комплексах.

Импортные высокопродуктивные животные не смогут достичь технологических параметров продуктивности в промышленных комплексах Беларуси, которые построены по старым нормам (большая теплопроводность стен, потолков, окон, пола), из-за чего невозможно нормализовать зооигиенические параметры микроклимата в помещениях.

Учитывая изложенное, можно заключить, что собственные племенные ресурсы в свиноводстве в Беларуси представляют большой интерес. На их основе производится основная доля свинины (более 90 %). Завезенный из-за рубежа генетический потенциал целесообразно использовать в селекционных программах для улучшения мясных качеств отечественных пород и на их основе создавать новые высокопродуктивные заводские типы и породы.

С этой целью нами разработаны селекционные приемы и методы по улучшению животных отечественных пород импортными хряками. Например, используя методы вводного и поглотительного скрещивания, маток белорусской крупной белой породы оплодотворяют хряками породы йоркшир, а маток белорусской мясной породы – хряками породы ландрас. Через 2–3 поколения мы получили животных новых мясных генотипов с сохранением высоких репродуктивных качеств, улучшенными откормочными и мясными качествами, крепкого типа телосложения, а также высокими адаптационными способностями и сохранностью молодняка. Динамика запланированной продуктивности свиней новых генераций представлена в табл. 1, 2.

Т а б л и ц а 1. Динамика улучшения показателей продуктивности свиней белорусской крупной-белой породы

T a b l e 1. Dynamics of improvement of the productivity indicators of Belarusian large white pigs

Показатель Index	Год Year			Эффект селекции Selection effect			
	2020	2025	2030	+/- 2025 к 2020	%	+/- 2030 к 2020	%
Многоплодие, гол	11,9	12,3	12,5	+0,4	3,4	+0,6	5,0
Возраст достижения живой массы 100 кг, дней	176	170	166	-6	3,4	-10	9,4
Среднесуточный прирост, г	785	785	850	+25	3,2	+65	8,3
Расход корма на 1 кг прироста, к. ед.	3,2	3,0	2,9	-0,2	6,2	-0,3	9,4
Толщина шпика, мм	25	23	22	-0,2	8,0	-0,3	12,0
Масса окорока, кг	11,1	11,2	11,3	+0,1	0,9	+0,2	1,8
Выход мяса в туше, %	58	59	60	+1,0	1,0	+0,2	2,0

Т а б л и ц а 2. Прогнозные показатели продуктивности свиней белорусской мясной породы

T a b l e 2. Prediction productivity indicators of Belarusian meat pigs

Показатель Index	Год Year			Эффект селекции Selection effect			
	2020	2025	2030	+/- 2025 к 2020	%	+/- 2030 к 2020	%
Многоплодие, гол	10,9	11,2	11,5	+0,3	2,8	+0,6	55,5
Возраст достижения живой массы 100 кг, дней	178	167	163	-11	6,2	-15	8,4
Среднесуточный прирост, г	820	860	900	+40	4,9	+80	9,8
Расход корма на 1 кг прироста, к. ед.	3,0	2,9	2,8	-0,1	3,3	-0,2	6,7
Толщина шпика, мм	20	18	16	-2	10,0	-4	20,0
Масса окорок, кг	11	11,2	11,5	+0,25	1,8	+0,5	4,5
Выход мяса в туше, %	63	64	65	+1	1,6	+3	4,8

Результаты табл. 1 свидетельствуют, что показатели многоплодия свиноматок материнских пород к 2025 и к 2030 гг. возрастут соответственно на 3,4 и 5,0 %, возраст достижения живой массы 100 кг снизится на 3,4–9,4 %, среднесуточный прирост возрастет соответственно на 1–2 %. Следует отметить, что прогнозные показатели продуктивных качеств свиней белорусских материнских пород к 2030 г. достигнут показателей породы йоркшир.

Белорусская мясная порода свиней широко используется в республиканской системе скрещивания и гибридизации в качестве отцовской и материнской форм. В настоящее время продолжается совершенствование мясных признаков животных этой породы путем использования генофонда породы ландрас датской и канадской селекции. В базовых хозяйствах получено новое поколение в белорусской мясной породе с прилитием крови животных улучшающих пород с продуктивностью: многоплодие – 11,5–11,6 кг, возраст достижения живой массы 100 кг – 172 дня, среднесуточный прирост – 810–820 г, расход корма на 1 кг прироста – 3,0–3,2 к. ед., толщина шпика – 25,0–27,0 мм, масса окорока – 11,0 кг, выход мяса в туше – 62,0–63,0 %.

К 2030 г. показатели продуктивности животных белорусской мясной породы приблизятся к показателям репродуктивных, откормочных и мясных качеств породы ландрас (табл. 2).

Разработанная перспективная система племенной работы в свиноводстве Республики Беларусь за счет ввода в действие инновационных объектов позволит полностью решить проблему получения как чистопородных, так и гибридных свиней в достаточном количестве для нужд промышленных комплексов, не уступающих лучшим зарубежным аналогам. Однако учитывая менталитет белорусского народа, а также специфические требования рынка, когда определенная часть населения предпочитает более жирную свинину и сало, возникает необходимость часть свинины производить от животных мясо-сального направления продуктивности (т. е. от отечественных пород).

На наш взгляд, на данном этапе наиболее целесообразно производить в республике 50–60 % мясной свинины и 40–50 % традиционной мясо-сальной. При этом будут удовлетворены потребности и населения и мясокомбинатов в шпике для производства высокоценных колбасных изделий.

Мясная свинина будет производиться в первую очередь в хозяйствах, входящих в новую систему (племзаводы первого порядка, их племрепродукторы и вновь построенные комплексы). При переходе на эту систему ведения свиноводства в республике за счет высокого генетического потенциала родительских форм в нуклеусах и использования научно обоснованных схем гибридизации к 2025 г. будет получено на промышленных комплексах Беларуси 4,5 млн голов конкурентоспособных гибридов с высокими откормочными и мясными качествами при сокращении затрат сухого корма до 2,7–2,8 кг на 1 кг прироста и среднесуточным приростом на откорме 900 г.

На период до 2030 г. в свиноводстве особое внимание должно быть уделено использованию ресурсосберегающих технологий и новейших научных разработок, оптимизации ресурсного потенциала отрасли. Приоритет должен быть отдан внедрению инновационных технологий и совершенствованию селекционной работы.

Оптимальное поголовье свиней в Беларуси согласно имеющимся технологическим, ресурсным и кормовым возможностям к 2030 г. может быть в пределах 3580–3600 тыс. гол. (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Прогнозные показатели развития свиноводства в Беларуси

Table 3. Prediction indicators of the pig breeding in Belarus

Год Year	Поголовье свиней, тыс. гол Pig population, thousand heads	Среднесуточный прирост, г Average daily gain, g	Продукция выращивания, тыс. т Cultivation products, thousand tons	Расход кормов на 1 ц прироста, ц к. ед. Feed consumption per 1 centner of gain, centner of feed units	Затраты труда на 1 ц продукции, чел. час Labor costs per 1 centner of production, person hour
2020 (факт)	2840,6	593,0	495,3	3,4	9,1
<i>Прогноз</i>					
2021	3100	620	540	3,2	9,0
2022	3200	650	560	3,1	8,8
2023	3300	670	570	3,0	8,5
2024	3400	700	580	2,9	7,8
2025	3550	720	600	2,8	7,3
2030	3600	730	620	2,75	7,0

При обеспечении нормативного кормления всех технологических групп свиней от рождения до сдачи на мясокомбинаты среднесуточные приросты на откорме возрастут на 18–20 % и составят 720–730 г при общей продукции выращивания 600–620 тыс. т. Расход кормов на 1 ц прироста при сбалансированном кормлении может сократиться до 2,75 ц к. ед., или на 19 %.

Производительность труда является важнейшим показателем технологического развития отраслей животноводства. За счет отработки и использования инновационных технологий затраты труда на 1 ц продукции сократятся с 9,1 до 7,0 чел. ч, или на 23 %.

Опыт селекционеров многих стран свидетельствует, что использование традиционных методов селекции по формированию оптимальной структуры породы не обеспечивает в должной степени необходимых темпов роста производства животноводческой продукции. В современных условиях повышение эффективности селекционно-племенной работы в свиноводстве основано на использовании генетических методов, включающих: индивидуальную оценку племенных особей по основным селекционируемым признакам, оценку генома каждого племенного животного, использование селекционных индексов, позволяющих выявить истинный генетический потенциал животных и прогнозировать продуктивные качества их потомства.

В наших исследованиях по результатам генетического тестирования животных исследуемых пород и их сочетаний выявлена генетическая структура различных генотипов по локусам генов RYR1, идентифицированы генотипы свиней: RYR1<sup>NN</sup> – стрессустойчивые носители, гетерозиготная форма генотипа RYR1<sup>Nn</sup> – стрессустойчивые скрытые носители, гомозиготная форма генотипа RYR1<sup>nn</sup> – стрессчувствительный ген (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Генетическая структура различных генотипов свиней по локусу гена RYR-1

Table 4. Genetic structure of different pig genotypes according to the RYR-1 gene locus

Сочетание генотипов ♀ × ♂ Combination of genotypes ♀ × ♂	Количество голов Number of heads	Частоты встречаемости генотипов Frequency of genotypes		
		NN	Nn	nn
<i>Контрольные группы</i>				
БКБ × БКБ	72	82	18	–
БМ × БМ	65	80	20	–
БКБ × БМ	68	80	20	–
<i>Опытные группы</i>				
Й × Й	70	76	24	–
Л × Л	75	72	27	–
Й × Л	62	74	26	–
Л × Й	48	73	27	–

Как показывают данные рис. 1 в генетической структуре оцениваемых генотипов по локусу генов RYR1 концентрация стрессоустойчивых носителей аллелей RYR1<sup>NN</sup> достигает 0,780–0,910, стрессоустойчивых скрытых носителей RYR1<sup>Nn</sup> – 0,090–0,220, а по стрессчувствительным генам RYR1<sup>nn</sup> – концентрация отсутствует, что указывает на отсутствие необходимости проведения у свиноматок пород йоркшир и ландрас в дальнейшем полномасштабной молекулярной генной диагностики стрессовой чувствительности. С целью исключения появления стрессчувствительных животных, достаточно проведения диагностики среди используемых и ремонтных хряков.

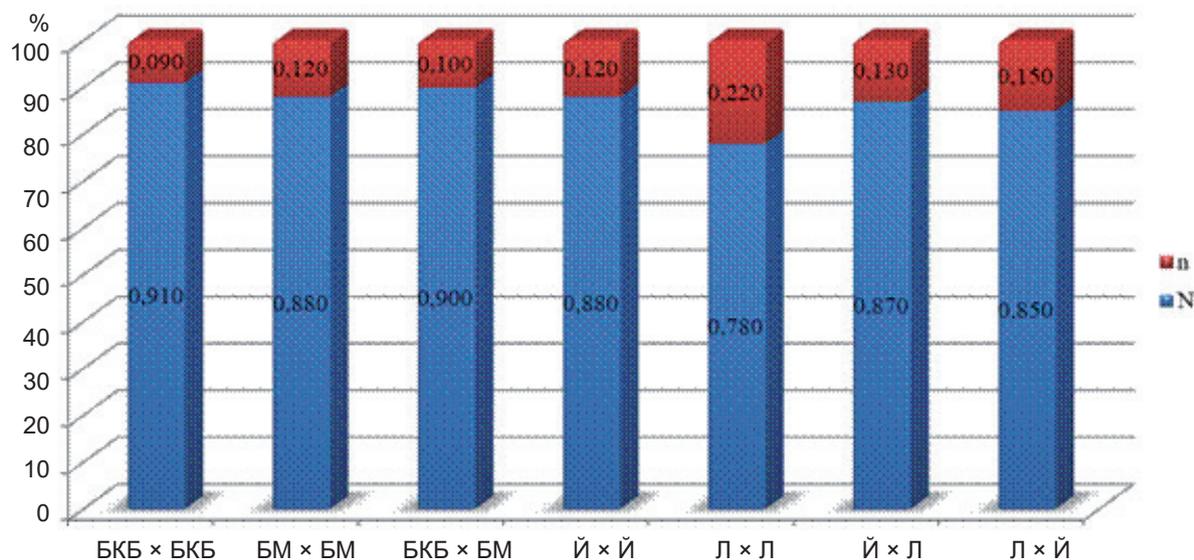


Рис. 1. Концентрация аллелей по локусу гена RYR-1

Fig. 1. Allele concentration according to the RYR-1 gene locus

По результатам исследований наиболее тесная ассоциация с репродуктивными признаками была установлена для гена эстрогенового рецептора ESR. Этот ген кодирует альфа-рецептор гормонов эстрогенов, которые участвуют в регуляции активности репродуктивной системы самок.

Выявленный полиморфизм гена ESR у животных контрольных и опытных групп представлен двумя аллелями А и В, и установлено наличие трех генотипов АА, АВ и ВВ (рис. 2).

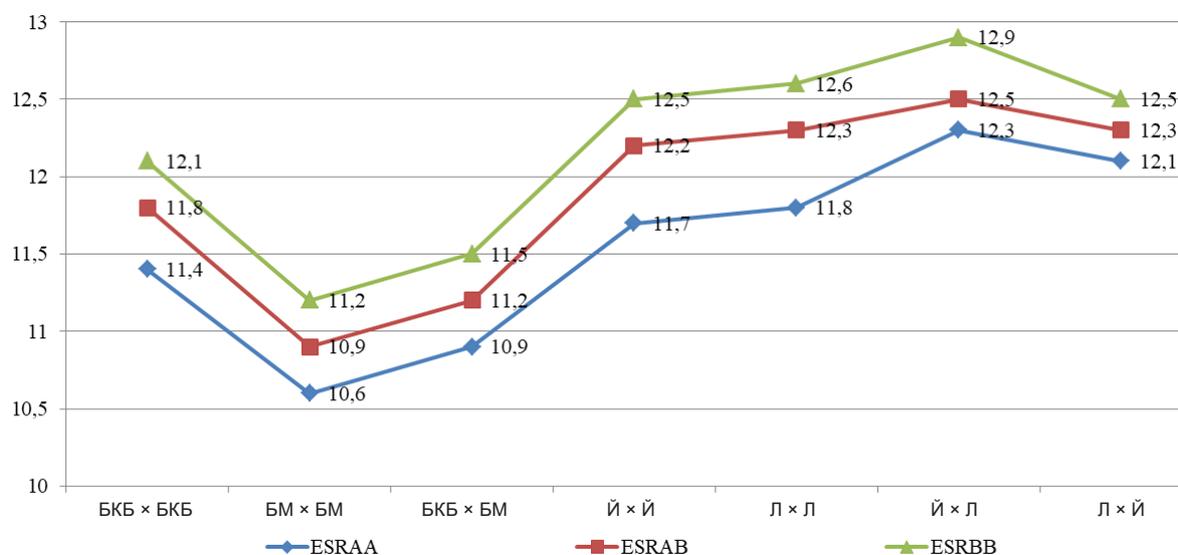


Рис. 2. Многоплодие у свиноматок различных сочетаний в зависимости от генотипа по гену ESR

Fig. 2. High fertility of different-combination sows depending on the genotype according to the ESR gene

Анализ рис. 2 показывает, что свиноматки контрольных и опытных групп всех породных сочетаний генотипа  $ESR^{BB}$  превосходили по многоплодию аналоги генотипа  $ESR^{AA}$  соответственно на 0,7 и 1,5 гол., или 6,1 и 13,3 % и на 0,6 и 1,2 гол., или 4,8 и 10,2 %. Разница по многоплодию по контрольным группам свиноматок генотипа  $ESR^{BB}$  и аналогов генотипа  $ESR^{AB}$  составила 0,3 и 1,2 гол., или 2,7 и 11,0 % в пользу животных генотипа  $ESR^{BB}$ , а по опытным свиноматкам соответствующих генотипов – 0,4 и 0,7 гол., или 3,2 и 5,7 %. Выявленные преимущества по многоплодию у животных с генотипами  $ESR^{BB}$  и  $ESR^{AB}$  позволяют выделить аллель  $ESR^{BB}$  как предпочтительный, а аллель  $ESR^{AB}$  – как желательный для дальнейшей селекции.

Аналогичная закономерность выявлена и по показателю массы гнезда при отъеме с учетом генотипа по гену  $ESR$ . Установлено (рис. 3), что масса гнезда при отъеме значительно выше у свиноматок контрольных и опытных групп с гомозиготным генотипом  $ESR^{BB}$ , свиноматки с гетерозиготным генотипом  $ESR^{AB}$  занимают промежуточное положение между гомозиготными аллелями. Особи свиноматок всех породных сочетаний с гомозиготным генотипом  $ESR^{BB}$  обладали превосходством по массе гнезда при отъеме над гомозиготами  $ESR^{AA}$  по контрольным группам на 7,4–19,5 кг, или 7,1 и 21,0 %, а по опытным на 5,7–15,4 кг, или 5,0 и 14,7 %. По гетерозиготным генотипам превосходство составило соответственно 6,1–18,3 кг, или 5,7 и 19,5 % и 2,8 и 13,5 кг, или 2,4 и 12,6 %.

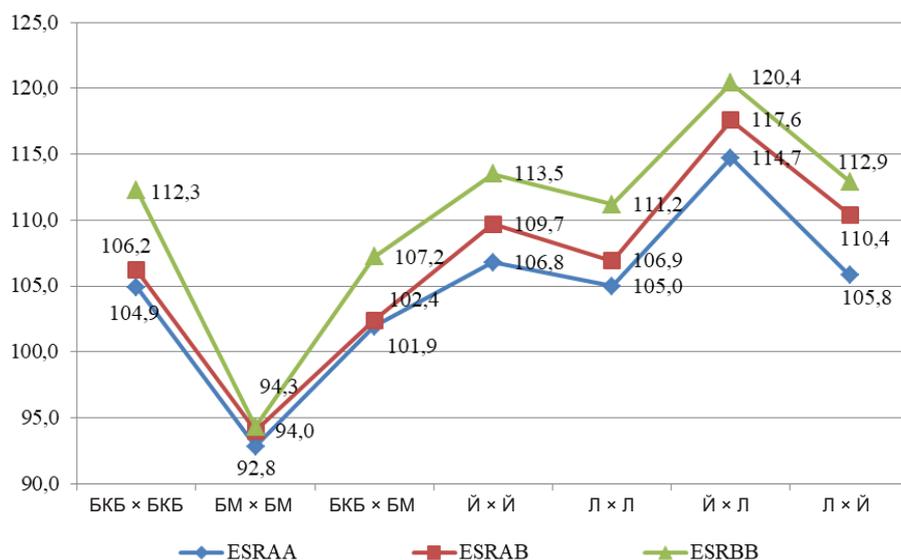


Рис. 3. Масса гнезда при отъеме у свиноматок различных сочетаний в зависимости от генотипа по гену  $ESR$

Fig. 3. Weaning weigh-crush of different-combination sows depending on the genotype according to the  $ESR$  gene

Следовательно, проведение селекции, направленной на разведение животных с предпочтительными генотипами, позволит до 13,3 % увеличить многоплодие маток и до 23,9 % – массу гнезда при отъеме. В связи с этим большой интерес представляет изучение полиморфизма гена  $ESR$ . Использование информации на основе ДНК (селекция с помощью маркеров) в сочетании с традиционными методами отбора позволяют существенно ускорить темпы селекции признаков, характеризующих репродуктивные качества свиней.

В селекционном процессе очень важно определить ДНК-маркер, по полиморфизму которого можно судить о показателях откормочных и мясных качеств молодняка свиней. В своих исследованиях мы изучали показатели среднесуточного прироста, затрат корма на прирост, толщину шпика над 6–7 грудными позвонками и массой задней трети полутуши молодняка различных сочетаний в зависимости от генотипа  $H-FABP$  и выявили положительную ассоциацию с рядом признаков (табл. 5).

По результатам исследований установлено положительное влияние генотипов  $H-FABP^{hh}$  и  $H-FABP^{dd}$  на улучшение всех оцениваемых признаков по группам контрольных и опытных жи-

Т а б л и ц а 5. Показатели откормочных и мясных качеств молодняка и различных сочетаний в зависимости от генотипа H-FABP

T a b l e 5. Indicators of fattening and meat qualities of young pigs and different combinations depending on the H-FABP genotype

Сочетание генотипов ♀ × ♂ Combination of genotypes ♀ × ♂	Генотип Genotype			
	H-FABP <sup>HH</sup>	H-FABP <sup>dd</sup>	H-FABP <sup>hh</sup>	H-FABP <sup>Dd</sup>
<i>Среднесуточный прирост, г / Затраты корма на прирост, к. ед.</i>				
БКБ × БКБ	735 / 3,20	732 / 3,19	708 / 3,44	716 / 3,39
БМ × БМ	748 / 3,06	752 / 3,02	718 / 3,18	717 / 3,29
БКБ × БМ	769 / 3,00	758 / 3,04	740 / 3,14	748 / 3,12
Й × Й	798 / 2,88	789 / 2,90	760 / 2,99	756 / 3,00
Л × Л	779 / 2,86	782 / 2,89	748 / 3,04	750 / 3,00
Й × Л	812 / 2,82	804 / 2,90	780 / 2,98	784 / 2,92
Л × Й	804 / 2,88	807 / 2,85	775 / 3,02	780 / 3,00
<i>Толщина шпика над 6–7 грудными позвонками, мм / Масса задней трети полутуши, кг</i>				
БКБ × БКБ	24,2 / 11,3	24,0 / 11,5	26,4 / 10,6	26,3 / 10,5
БМ × БМ	17,8 / 11,6	17,6 / 11,6	19,0 / 11,2	19,2 / 11,3
БКБ × БМ	19,2 / 11,4	19,4 / 11,3	22,3 / 11,0	20,6 / 10,9
Й × Й	12,2 / 11,9	12,8 / 11,8	14,2 / 11,8	14,8 / 11,7
Л × Л	11,8 / 12,4	11,7 / 12,3	13,3 / 11,9	13,1 / 11,8
Й × Л	12,8 / 12,2	12,3 / 12,1	13,9 / 11,7	13,8 / 11,8
Л × Й	12,6 / 12,4	12,5 / 12,3	14,0 / 11,6	13,9 / 11,9

вотных. Проведение селекции свиней с учетом изученной ассоциации позволяет значительно улучшить откормочные качества свиней по сравнению с аналогами генотипов H-FABP<sup>hh</sup> и H-FABP<sup>Dd</sup>.

Так, среднесуточный прирост откормочного молодняка контрольных групп генотипа H-FABP<sup>hh</sup> колебался в пределах 735–769 г, а по группам опытного молодняка – 779–812 г, что соответственно выше по сравнению с молодняком контрольных и опытных групп генотипа H-FABP<sup>hh</sup> на 29–61 г, или 3,9–8,6 % и 32–64 г, или 4,1–8,5 %, а по сравнению с аналогами генотипа H-FABP<sup>Dd</sup> преимущество составило по контрольным группам 21–53 г, или 2,8–7,4 %, по опытным – 28–62 г, или 3,6–8,3 %. Затраты корма на прирост по контрольным группам генотипов H-FABP<sup>hh</sup> и H-FABP<sup>dd</sup> снижены по сравнению с аналогами генотипа H-FABP<sup>hh</sup> на 3,5–12,8 % и H-FABP<sup>Dd</sup> – на 3,8–11,5 %, а по отношению к сверстникам опытных групп генотипа H-FABP<sup>hh</sup> соответственно на 3,4–7,2 %, генотипа H-FABP<sup>Dd</sup> – на 3,4–6,0 %.

Аналогичная закономерность выявлена и по мясным качествам контрольного и опытного молодняка с положительным влиянием на селекционируемые признаки генотипов H-FABP<sup>hh</sup> и H-FABP<sup>dd</sup>, обеспечивающих в среднем снижение толщины шпика от 4,3 до 10,5 %, массы окорока – от 2,7 до 10,8 %.

Таким образом, в результате проведенных исследований изучен полиморфизм генов RYR-1, ESR и H-FABP у селекционируемых пород свиней в Беларуси и их сочетаний, ассоциированных с чувствительностью к стрессам, а также репродуктивными, откормочными и мясными качествами.

В гене RYR-1 диагностировано два аллеля: RYR<sup>N</sup> – без мутации и RYR<sup>n</sup> – с точечной мутацией. Идентифицированы генотипы свиней: RYR<sup>NN</sup> – стрессустойчивые носители, гетерозиготная форма генотипа RYR<sup>Nn</sup> – стрессустойчивые скрытые носители, гомозиготная форма генотипа RYR<sup>nn</sup> – стрессчувствительный ген.

В гене ESR диагностированы аллели ESR<sup>A</sup> и ESR<sup>B</sup>, отвечающие за репродуктивные, откормочные и мясные качества, и установлено наличие трех генотипов AA, AB и BB.

По гену H-FABP<sup>hh</sup> выявлена закономерность улучшения откормочных и мясных качеств генотипов H-FABP<sup>HH</sup> и H-FABP<sup>dd</sup>.

На основе выявленных закономерностей взаимосвязи полиморфизма генов RYR-1, ESR и H-FABP с продуктивными признаками свиней предложены генетические маркеры для селекции свиней на повышение показателей репродуктивных, откормочных и мясных качеств. Использование данных маркеров в селекции позволит проводить ДНК-тестирование племенных животных и ремонтного молодняка в раннем возрасте независимо от пола.

Из изложенного материала можно заключить, что уровень технологического развития животноводства зависит, в конечном счете, от уровня инвестиций в производство. Инвестиции и инновационные программы, направленные непосредственно на обеспечение жизнедеятельности животных (кормление, выращивание ремонтного молодняка, племенная работа, ветеринарное обслуживание и т. д.), обеспечивают рост их продуктивности.

На период до 2030 г. в свиноводстве особое внимание должно быть уделено использованию ресурсосберегающих технологий и новейших научных разработок, оптимизации ресурсного потенциала отрасли. Приоритет должен быть отдан внедрению инновационных технологий и совершенствованию селекционно-племенной работы.

Уровень технологического развития животноводства зависит, в конечном счете, от уровня инвестиций в производство. Инвестиции и инновационные программы, направленные непосредственно на обеспечение жизнедеятельности животных (кормление, выращивание ремонтного молодняка, племенная работа, ветеринарное обслуживание и т. д.), обеспечивают рост их продуктивности.

Инвестиции в механизацию и автоматизацию технологических процессов, организацию производства, профобразование и т. д. способствуют снижению затрат труда на производство продукции. Чем выше продуктивность животных и ниже прямые затраты труда на производство продукции, тем выше уровень технологического развития животноводства.

Оценивая уровень технологического развития свиноводства в Беларуси на период до 2030 г. мы рассчитали индексы на все прогнозируемые годы (2020–2030 гг.). В расчетные показатели индекса ( $I_{\text{утр.с}}$ ) взяли среднесуточные приросты по годам прогноза и затраты труда на 1 ц прироста продукции на откорме и выращивании. Индекс уровня технологического развития производства свинины рассчитывали по формуле

$$I_{\text{утр.с}} = \frac{P_{\text{pc}}}{T_{\text{с}}},$$

где  $P_{\text{pc}}$  – среднесуточные приросты свиней на откорме и выращивании;  $T_{\text{с}}$  – прямые затраты труда на производство 1 ц продукции выращивания и откорма свиней, чел-ч.

На основании анализа, обобщения и группировки соответствующей информации о работе свиноводческих предприятий республики было установлено, что индекс уровня технологического развития свиноводства ( $I_{\text{утр.с}}$ ) до 60 соответствует низкому, от 61 до 70 – среднему, от 71 до 80 – умеренно высокому, от 81 до 90 – высокому и свыше 91 – интенсивному уровню технологического развития отрасли (табл. 6).

Т а б л и ц а 6. Прогнозный уровень технического развития свиноводства в Беларуси

Table 6. Forecast of the technological development level of pig breeding in Belarus

Год Year	Прогноз уровня технологического развития отрасли Forecast of the technological development level	
	Индекс развития отрасли Branch development index	Уровень технологического развития Technological development level
2020 (факт)	64,1	Средний
<i>Прогноз</i>		
2021	68,9	Средний
2022	71,6	Умеренно-высокий
2023	76,5	Умеренно-высокий
2024	81,7	Высокий
2025	92,0	Интенсивный
2030	95,9	Интенсивный

Существующий уровень технологического развития отрасли свиноводства в Беларуси оценивается как средний. В 2020–2021 гг. будет осуществлен переход свиноводства на умеренно-высокий, в 2022–2023 гг. – на высокий, а с 2024–2025 гг. – на интенсивный уровень технологического развития.

**Заключение.** Разработанные нами оценочные уровни технологического развития свиноводства вписываются в рамки технологических укладов и соответствуют им. Анализ современного состояния и прогноз развития этой отрасли показал, что в целом по сельскохозяйственным организациям Беларуси свиноводство по уровню технологического развития к 2025–2030 гг. достигнет 5-го технологического уклада и будет соответствовать высокому европейскому уровню.

Преимущество свиней белорусских пород над импортными аналогами заключается в высоком качестве свинины, крепости конституции и сохранности поросят. Проводимая РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству» научная и практическая работа служит повышению эффективности отрасли животноводства и конкурентоспособности производимой в республике животноводческой продукции.

### Список использованных источников

1. Развитие бизнеса в аграрном секторе экономики Республики Беларусь / под ред. В. Г. Гусакова. – Минск, 2017. – 251 с.
2. Продовольственная безопасность Республики Беларусь. Мониторинг-2016: социально-экономические аспекты / В. Г. Гусаков [и др.]. – Минск, 2017. – 210 с.
3. Влияние хряков некоторых импортных пород на мясную продуктивность гибридного молодняка / Л. А. Федоренкова [и др.] // Зоотехническая наука Беларуси. – Жодино, 2005. – Т. 40. – С. 128–132.
4. Шейко, И. П. Пути развития свиноводства в Республике Беларусь / И. П. Шейко // Совершенствования существующих и создание новых генотипов и технологий содержания свиней. – Жодино, 1995. – С. 3–4.
5. Шейко, И. П. Новая мясная порода свиней в Беларуси / И. П. Шейко, Л. А. Федоренкова, Р. И. Шейко // Актуальные проблемы интенсификации производства продукции животноводства. – Минск, 1999. – С. 22–25.
6. Шейко, И. П. Эффект гетерозиса будет гарантирован / И. П. Шейко // Свиноводство. – 1993. – № 1. – С. 14–18.
7. Горобец, В. О. Продуктивность гибридных свиней в зависимости от сочетаемости родительских пород / В. О. Горобец // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. – Горки, 2015. – С. 297–302.
8. Эффективность применения новых вариантов породно-линейных гибридов свиней / И. П. Шейко [и др.] // Зоотехническая наука Беларуси. – Жодино, 2019. – Т. 54, ч. 1. – С. 164–170.
9. Бальников, А. А. Сравнительная оценка селекционно-генетических параметров свиноматок-первоопоросок различных генотипов / А. А. Бальников // Зоотехническая наука Беларуси. – Жодино, 2014. – Т. 49, ч. 1. – С. 8–16.
10. Шейко, И. П. Продуктивность чистопородных и помесных маток при скрещивании с хряками специализированных мясных пород / И. П. Шейко, А. Ф. Мельников // Перспективы развития свиноводства. – Гродно, 2003. – С. 30–32.
11. Создание высокопродуктивных заводских линий в белорусском заводском типе свиней породы йоркшир / Е. С. Гридюшко [и др.] // Гл. зоотехник. – 2019. – № 12. – С. 38–50.
12. Шейко, Р. И. Теоретические и практические приемы и методы в селекции свиней, обеспечивающие высокий эффект гетерозиса в системах гибридизации. – Жодино, 2011. – 44 с.
13. ДНК-технологии в животноводстве / Н. В. Михайлов [и др.] // Актуальные проблемы развития биотехнологий. – Екатеринбург, 2013. – С. 147–148.
14. ДНК-технологии в селекции свиней / Г. М. Гончаренко [и др.] // Современные проблемы интенсификации производства свинины в странах СНГ. – Ульяновск, 2010. – Т. 2. – С. 98–105.

### References

1. Gusakov V. G., ed. *Business development in the agricultural sector of the economy of the Republic of Belarus*. Minsk, 2017. 251 p. (in Russian).
2. Gusakov V. G., Shpak A. P., Lomakina A. L., Poleshchuk I. V., Kireenko N. V., Kondratenko S. A. [et al.]. *Food security of the Republic of Belarus. Monitoring 2016: socio-economic aspects*. Minsk, 2017. 210 p. (in Russian).
3. Fedorenkova L. A., Sheyko R. I., Podskriobkin N. V., Melnikov A. F. The influence of foreign boars on meat productivity of hybrids. *Zootekhnicheskaya nauka Belarusi* [Zootechnical science of Belarus]. Zhodino, 2005, vol. 40, pp. 128–132 (in Russian).
4. Sheyko I. P. Ways of developing pig farming in the Republic of Belarus. *Sovershenstvovaniya sushchestvuyushchikh i sozdanie novykh genotipov i tekhnologii soderzhaniya svinei* [Improving the existing genotypes and creating new ones and pig keeping technologies]. Zhodino, 1995, pp. 3–4 (in Russian).
5. Sheyko I. P., Fedorenkova L. A., Sheyko R. I. New meat pigs in Belarus. *Aktual'nye problemy intensifikatsii proizvodstva produktov zhivotnovodstva* [Actual problems of intensifying the production of livestock products]. Zhodino, 1999, pp. 22–25 (in Russian).

6. Sheiko I. P. The heterosis effect will be guaranteed. *Svinovodstvo = Pig Breeding*, 1993, no. 1, pp. 14–18 (in Russian).
7. Gorobets V. O. Productivity of hybrid pigs depending on parent breed compatibility. *Aktual'nye problemy intensivnogo razvitiya zhivotnovodstva* [Actual problems of the intensive development of animal husbandry]. Gorki, 2015, pp. 297–302 (in Russian).
8. Sheyko I. P., Sheyko R. I., Timoshenko T. N., Zayats V. N., Pristupa N. V., Yanovich Y. A., Anikhovskaya I. V., Tsaruk N. V., Kapshevich E. A. Efficiency of new variants of breed and linear hybrids of pigs. *Zootekhnikeskaya nauka Belarusi* [Zootechnical science of Belarus]. Zhodino, 2019, vol. 57, pt. 1, pp. 164–170 (in Russian).
9. Bal'nikov A. A. Comparative evaluation of breeding and genetic parameters of first farrowing sows of different genotypes. *Zootekhnikeskaya nauka Belarusi* [Zootechnical science of Belarus]. Zhodino, 2014, vol. 49, pt. 1, pp. 8–16 (in Russian).
10. Sheiko I. P., Mel'nikov A. F. The productivity of purebred and crossbred sows when breeding with boars of specialized meat breeds. *Perspektivy razvitiya svinovodstva* [Prospects for the development of pig breeding]. Grodno, 2003, pp. 30–32 (in Russian).
11. Gridyushko E. S., Kostomakhin N. M., Gridyushko I. F., Balnikov A. A., Kazutova Yu. S. Breeding of highly productive stud lines in belarusian stud type pigs of yorkshire breed. *Glavnyi zootehnik* [Chief Livestock Officer], 2019, no. 12, pp. 38–50 (in Russian).
12. Sheyko R. I. *Theoretical and practical techniques and methods in pig breeding, providing a high effect of heterosis in hybridization systems*. Zhodino, 2011. 44 p. (in Russian).
13. Mikhailov N. V., Kolosov Yu. A., Getmantseva L. V., Shirokova N. V. DNA technologies in animal husbandry. *Aktual'nye problemy razvitiya biotekhnologii* [Actual problems of biotechnology development]. Yekaterinburg, 2013, pp. 147–148 (in Russian).
14. Goncharenko G. M., Bekenev V. A., Akulich E. G., Grishina N. B., Goryacheva T. S., Kononenko E. V., Frolova V. I. DNA technologies in pig breeding. *Sovremennye problemy intensivifikatsii proizvodstva svininy v stranakh SNG* [Modern problems of intensification of pork production in the CIS countries]. Ulyanovsk, 2010, vol. 2, pp. 98–105 (in Russian).

### Информация об авторах

*Шейко Иван Павлович* – академик, д-р с.-х. наук, профессор, первый заместитель генерального директора. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

*Тимошенко Татьяна Николаевна* – канд. с.-х. наук, доцент, гл. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: nice.marina.78@mail.ru.

*Приступа Наталья Владимировна* – канд. с.-х. наук, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: natali.pristupa.77@mail.ru.

*Янович Елена Анатольевна* – канд. с.-х. наук, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: yanovichhelena@mail.ru.

*Заяц Владимир Николаевич* – канд. с.-х. наук, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: wowa4006@mail.ru.

*Шейко Руслан Иванович* – член-корреспондент, д-р с.-х. наук, доцент, директор. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: R.I.Sheyko@igc.by.

*Казаровец Ирина Николаевна* – НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Республика Беларусь).

*Бурнос Антон Чеславович* – кандидат с.-х. наук, вед. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: burnos-1987@mail.ru.

*Коско Иван Сергеевич* – науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Республика Беларусь). E-mail: kosko5121989@mail.ru.

### Information about the authors

*Sheyko Ivan P.* – Academician, D. Sc. (Agrarian), Professor, First Deputy General Director. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.

*Timoshenko Tatyana N.* – Ph. D. (Agrarian), Associate professor, Chief researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: nice.marina.78@mail.ru.

*Pristupa Natalya V.* – Ph. D. (Agrarian), Leading researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: natali.pristupa.77@mail.ru.

*Yanovich Elena A.* – Ph. D. (Agrarian), Leading researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: yanovichhelena@mail.ru.

*Zayats Vladimir N.* – Ph. D. (Agrarian), Leading researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: wowa4006@mail.ru.

*Sheyko Ruslan I.* – Corresponding Member, D. Sc. (Agrarian), Associate Professor, Director. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: R.I.Sheyko@igc.by.

*Kazarovets Irina N.* – Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus).

*Burnos Anton C.* – Ph. D. (Agrarian). Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: burnos-1987@mail.ru.

*Kosko Ivan S.* – Researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Republic of Belarus). E-mail: kosko5121989@mail.ru.