

# ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

---

МИНСК. БЕЛОРУССКАЯ НАУКА. 2018. ТОМ 62. № 4

---

Выходит шесть номеров в год

Журнал основан в июле 1957 года

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

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

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

Главный редактор

**Владимир Григорьевич Гусаков**

Председатель Президиума Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Редакционная коллегия

**С. А. Чижик**

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

**С. Я. Килин**

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

**А. В. Кильчевский**

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

**Т. П. Петрович**

(ведущий редактор журнала)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Ф. Ф. Комаров** – Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко  
Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

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

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

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

- О. Н. Левко** – Институт истории Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**А. И. Лесникович** – Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь  
**В. Ф. Логинов** – Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**А. А. Махнач** – Научно-производственный центр по геологии, Минск, Беларусь  
**А. А. Михалевич** – Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**М. Е. Никифоров** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**В. А. Орлович** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**О. Г. Пенязков** – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**Ю. М. Плескачевский** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь  
**Н. С. Сердюченко** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**А. Ф. Смянович** – Республиканский научно-практический центр неврологии и нейрохирургии, Минск, Беларусь  
**Л. М. Томильчик** – Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**С. А. Усанов** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**Л. В. Хотылева** – Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**В. А. Хрипач** – Институт биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**И. П. Шейко** – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству, Жодино, Беларусь

Р е д а к ц и о н н ы й с о в е т

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

*Адрес редакции:*

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

---

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ. 2018. Т. 62. № 4

*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 07.08.2018. Выпуск в свет 29.08.2018. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 152 экз. Заказ 163.

Цена: индивидуальная подписка – 10,66 руб.; ведомственная подписка – 25,67 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

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

© «Издательский дом «Беларуская навука».  
Доклады НАН Беларуси, 2018

# DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

---

MINSK. BELARUSKAYA NAVUKA. 2018. Vol. 62. No. 4

---

Published bimonthly

The journal has been published since July, 1957

Founder – National Academy of Sciences of Belarus

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

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

Editor-in-Chief

**Vladimir Grigorievich Gusakov**

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

Editorial Board

**Sergey A. Chizhik**

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

**Sergey Ya. Kilin**

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

**Aleksandr V. Kilchevsky**

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

**Tatiana P. Petrovich**

(*Lead editor*)

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

**Alexey Ye. Daineko** – Institute for Meat and Dairy Industry of the Scientific  
and Practical Center for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

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

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

**Nikolai A. Izobov** – Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**Nikolai S. Kazak** – B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

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

**Vladimir A. Khripach** – Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**Fadei F. Komarov** – A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Belarus

**Igor V. Kotlyarov** – Commission for opinion polls of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

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

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

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

**Anatoly I. Lesnikovich** – Belarusian State University, Minsk, Belarus

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

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

#### Editorial Council

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

#### *Address of the Editorial Office:*

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

---

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS. 2018. Vol. 62. No. 4

*Printed in Russian, Belarusian and English languages*

---

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

Sent for press 07.08.2018. Output 29.08.2018. Format 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Offset paper.  
Digital press. Printed sheets 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 152 copies. Order 163.  
Price: individual subscription – 10,66 BYN, departmental subscription – 25,67 BYN.

Publisher and printing execution:

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

© RUE "Publishing House "Belaruskaya Navuka".  
Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus, 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАТЕМАТИКА

**Забрейко П. П., Пономарева С. В.** О разрешимости задачи Коши для уравнений с дробными производными Римана–Лиувилля ..... 391

**Васьковский М. М., Качан И. В.** Асимптотические разложения решений стохастических дифференциальных уравнений с дробными броуновскими движениями ..... 398

### ФИЗИКА

**Поклонский Н. А., Вырко С. А., Ковалев А. И.** Термическая энергия активации прыжковой  $\epsilon_2$ -электропроводности по атомам бора в слабо компенсированном кремнии ..... 406

**Климович И. М., Комаров Ф. Ф., Зайков В. А.** Влияние температуры нагрева подложек и потенциала смещения на оптические характеристики Ti–Al–C–N покрытий ..... 415

### ХИМИЯ

**Диченко Я. В., Гудный Е. С., Усанов С. А.** Структурные особенности цитохрома P450 7B1 человека с аминокислотной заменой Phe470Ile ..... 423

**Гилевская К. С., Красковский А. Н., Ладутько Е. И., Новик Г. И., Агабеков В. Е.** Получение и свойства гидрогелей на основе нанокompозита пектин-Ag, содержащих канамицин ..... 432

### БИОЛОГИЯ

**Гетко Н. В., Алехна А. И., Субоч В. П., Титок В. В.** Химический состав летучих компонентов в листьях цитрусовых растений, культивируемых в условиях оранжереи ..... 439

**Кочкин Д. В., Глаголева Е. С., Галишев Б. А., Спиридович Е. В., Носов А. М., Решетников В. Н.** Анализ гинзенозидов в корнях женьшеня настоящего (*Panax ginseng*), интродуцированного в Центральном ботаническом саду НАН Беларуси ..... 447

**Кузмицкая П. В., Урбанович О. Ю., Кильчевский А. В.** Идентификация генов, кодирующих стресс-ассоциированные белки, содержащие домены A20/AN1, в геноме яблони *in silico* и анализ их филогенетических связей ..... 455

### МЕДИЦИНА

**Рубникович С. П., Вологовский И. Д., Денисова Ю. Л., Владимирская Т. Э., Андреева В. А., Панасенкова Г. Ю.** Применение клеточных технологий для регенерации тканей периодонта в эксперименте ..... 463

### НАУКИ О ЗЕМЛЕ

**Айзберг Р. Е., Грибик Я. Г.** Особенности глубинного строения и синрифтовой геодинамики Припятского и Днепровского сегментов земной коры ..... 473

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Песецкий С. С., Кривогуз Ю. М.** Смеси алифатических полиамидов с функционализированными полиолефинами: межфазные взаимодействия, особенности реологического поведения расплавов, структуры и механических свойств ..... 480

### СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

**Гусаков В. Г.** Основы системной экономики ..... 488

**Щёкин Н. С.** Институционализация моделей диалога церкви и государства в западноевропейской философской традиции ..... 495

### АГРАРНЫЕ НАУКИ

**Шейко И. П., Шейко Р. И.** Модели развития белорусского животноводства ..... 504

**CONTENTS***MATHEMATICS*

**Zabreiko P. P., Ponomareva S. V.** Solvability of the Cauchy problem for equations with Riemann–Liouville’s fractional derivatives ..... 391

**Vaskouski M. M., Kachan I. V.** Asymptotic expansions of solutions of stochastic differential equations driven by multivariate fractional Brownian motions ..... 398

*PHYSICS*

**Poklonski N. A., Vyrko S. A., Kovalev A. I.** Thermal activation energy of hopping  $\epsilon_2$ -conduction via boron atoms in weakly compensated silicon ..... 406

**Klimovich I. M., Komarov F. F., Zaikov V. A.** Influence of substrate heating and bias potential on the Ti–Al–C–N coatings optical characteristics ..... 415

*CHEMISTRY*

**Dzichenka Y. V., Gudny E. S., Usanov S. A.** Structural features of human cytochrome P450 7B1 with an amino acid substitution of Phe470Ile ..... 423

**Hileuskaya K. S., Kraskouski A. N., Ladutska A. I., Novik G. I., Agabekov V. E.** Preparation and properties of kanamycin-containing hydrogels based on pectin–Ag nanocomposite ..... 432

*BIOLOGY*

**Hetka N. V., Alehna A. I., Suboch V. P., Titok V. V.** Chemical composition of volatile components in the leaves of citrus plants cultivated under greenhouse conditions ..... 439

**Kochkin D. V., Glagoleva E. S., Galischev B. A., Spiridovich E. V., Nosov A. M., Reshetnikov V. N.** Analysis of gynzenosides in the roots of *Panax ginseng* introduced in the Central Botanical Garden of NAS of Belarus ..... 447

**Kuzmitskaya P. V., Urbanovich O. Yu., Kilchevsky A. V.** Identification of genes encoding stress-associated proteins containing the domains A20/AN1 in the apple genome *in silico* and analysis of their phylogenetic relationship ..... 455

*MEDICINE*

**Rubnikovich S. P., Volotovskiy I. D., Denisova Yu. L., Vladimirskaia T. E., Andreeva V. A., Panasenkova G. Yu.** Application of cellular technologies for regeneration of periodontal tissues in experiment ..... 463

*EARTH SCIENCES*

**Aizberg R. Ye., Gribik Ya. G.** Features of the deep structure and synrift geodynamics of the Pripyat and Dniepr segments of the earth crust ..... 473

*TECHNICAL SCIENCES*

**Pesetskii S. S., Krivoguz Yu. M.** Blends of aliphatic polyamides with functionalized polyolefins: interphase interactions, features of the rheological behavior of melts, structure and mechanical properties ..... 480

*SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES*

**Gusakov V. G.** Fundamentals of systemic economy ..... 488

**Shehikin N. S.** Institutionalization of models of dialogue between church and state in Western European philosophical tradition ..... 495

*AGRARIAN SCIENCES*

**Sheiko I. P., Sheiko R. I.** Development models of belarusian livestock breeding ..... 504

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

**МАТЕМАТИКА**  
**MATHEMATICS**

УДК 517.955:519.622  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-391-397>

Поступило в редакцию 11.05.2018  
Received 11.05.2018

**П. П. Забрейко, С. В. Пономарева**

*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*

**О РАЗРЕШИМОСТИ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ С ДРОБНЫМИ  
ПРОИЗВОДНЫМИ РИМАНА–ЛИУВИЛЛЯ**

*(Представлено членом-корреспондентом В. В. Гороховиком)*

**Аннотация.** Изучается вопрос о разрешимости аналога задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений с дробными производными Римана–Лиувилля с нелинейным ограничением на правую часть в определенных пространствах функций. Приводятся условия разрешимости рассматриваемой задачи в данных функциональных пространствах, а также условия существования единственного решения. При исследовании используются метод сведения задачи к уравнению Вольтерра второго рода, принцип Шаудера неподвижной точки в банаховом пространстве и принцип Банаха–Каччиопполи неподвижной точки в полном метрическом пространстве.

**Ключевые слова:** задача Коши, дробная производная Римана–Лиувилля, принцип Шаудера

**Для цитирования.** Забрейко, П. П. О разрешимости задачи Коши для уравнений с дробными производными Римана–Лиувилля / П. П. Забрейко, С. В. Пономарева // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 391–397. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-391-397>

**Petr P. Zabreiko, Svetlana V. Ponomareva**

*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus*

**SOLVABILITY OF THE CAUCHY PROBLEM FOR EQUATIONS  
WITH RIEMANN–LIOUVILLE’S FRACTIONAL DERIVATIVES**

*(Communicated by Corresponding Member Valentine V. Gorokhovich)*

**Abstract.** In this article we study the solvability of the analogue of the Cauchy problem for ordinary differential equations with Riemann–Liouville’s fractional derivatives with a nonlinear restriction on the right-hand side of functions in certain spaces. The conditions for solvability of the problem under consideration in given function spaces, as well as the conditions for existence of a unique solution are given. The study uses the method of reducing the problem to the second-kind Volterra equation, the Schauder principle of a fixed point in a Banach space, and the Banach–Cachoppoli principle of a fixed point in a complete metric space.

**Keywords:** Cauchy problem, fractional Riemann–Liouville derivative, Schauder principle

**For citation:** Zabreiko P. P., Ponomareva S. V. Solvability of the Cauchy problem for equations with Riemann–Liouville’s fractional derivatives. *Doklady Natsional’noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 391–397 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-391-397>

Рассмотрим дифференциальное уравнение

$$D^\alpha x(t) = f(t, x(t)) \quad (0 \leq t \leq T) \quad (1)$$

с дробной производной Римана–Лиувилля  $D^\alpha$  порядка  $\alpha$ ,  $0 < \alpha < 1$ . Напомним, что дробная производная Римана–Лиувилля определяется равенством

$$D^\alpha x(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \left( \frac{d}{dt} \right)_0^t \int_0^t \frac{x(s) ds}{(t-s)^\alpha}. \quad (2)$$

Относительно нелинейности  $f(s, u)$  будем предполагать, что она непрерывна по совокупности переменных на множестве  $(0, T] \times (-\infty, \infty)$ .

Как и в случае задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения, производная Римана–Лиувилля  $D^\alpha x(t)$  исходную функцию  $x(t)$  определяет неоднозначно. В самом деле, равенство  $D^\alpha x(t) = 0$  эквивалентно равенству

$$\frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \left( \frac{d}{dt} \right)_0^t \int_0^t \frac{x(s) ds}{(t-s)^\alpha} = 0,$$

откуда

$$\frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t \frac{x(s) ds}{(t-s)^\alpha} = \xi \quad (\xi \in R).$$

В свою очередь, из последнего равенства вытекает, что функция  $x(t)$  определяется равенством

$$x(t) = \xi t^{\alpha-1}.$$

Из этих рассуждений, известного определения интеграла дробного порядка Римана–Лиувилля

$$I^\alpha x(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t \frac{x(s) ds}{(t-s)^{1-\alpha}},$$

а также формулы композиции дробного интеграла и производной [1, с. 24] следует, что при отыскании решений дифференциального уравнения (1) естественно искать решения уравнения (1), удовлетворяющие дополнительному условию

$$\lim_{t \rightarrow 0} t^{1-\alpha} x(t) = \xi. \quad (3)$$

Отметим также, что задача Коши (1)–(3) может быть записана в эквивалентной форме (см., напр., [1, с. 28]):

$$\begin{cases} D^\alpha x(t) = f(t, x(t)), \\ D^{\alpha-1} x(0+) = \xi. \end{cases}$$

Здесь  $D^{\alpha-1} x(0+) \equiv I^{1-\alpha} x(0+) = \lim_{t \rightarrow 0+} I^{1-\alpha} x(t)$ .

Отыскание таких решений сводится к решению интегрального уравнения

$$x(t) = \frac{\xi t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} f(s, x(s)) ds. \quad (4)$$

Таким образом, отыскание решений дифференциального уравнения (1), удовлетворяющего начальному условию (3), сводится к отысканию неподвижных точек оператора

$$Ax(t) = \frac{\xi t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} f(s, x(s)) ds \quad (5)$$

в подходящем пространстве функций, определенных на отрезке  $[0, T]$ .

При ненулевых  $\xi \in R$  естественно ожидать, что неподвижные точки оператора (5) или, что то же самое, решения уравнения (4), имеют особенность в нуле типа  $t^{\alpha-1}$ . Этот факт означает, что уравнение (4) и оператор (5) естественно рассматривать в пространстве  $C_{1-\alpha}[0, T]$  определенных на отрезке  $[0, T]$  и непрерывных на  $(0, T]$  функций  $x(t)$ , для которых существует предел

$$x(*) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{x(t)}{t^{\alpha-1}}.$$

С нормой

$$\|x\|_{\alpha-1} = \sup_{0 < t \leq T} t^{1-\alpha} |x(t)| \tag{6}$$

это пространство является банаховым.

Помимо нормы (6) нам понадобятся эквивалентные ей нормы

$$\|x\|_u = \sup_{0 < t \leq T} t^{1-\alpha} u(t) |x(t)|,$$

где  $u(t)$  – заданная непрерывная положительная функция со значениями в некотором отрезке  $[m_-, m_+] \subset (0, \infty)$ .

Опишем простейшие условия, при которых оператор (5) действует в пространстве  $C_{1-\alpha}$ . Предположим, что нелинейность  $f(t, u)$  удовлетворяет неравенству

$$|f(t, u)| \leq \mu(t) + \nu(t)|u| \quad (0 < t \leq T, -\infty < u < \infty), \tag{7}$$

где  $\mu(t)$  и  $\nu(t)$  – некоторые неотрицательные функции со свойствами, которые будут описаны ниже. Тогда при  $x \in C_{1-\alpha}$  выполняется неравенство

$$|f(t, x(t))| \leq \mu(t) + \nu(t)|x(t)| \quad (0 < t \leq T).$$

Отсюда

$$|Ax(t)| \leq \frac{|\xi| t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} (\mu(s) + \nu(s)|x(s)|) ds \quad (0 < t \leq T)$$

и, далее,

$$\begin{aligned} |Ax(t)| &\leq \frac{|\xi| t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} \mu(s) ds + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} \nu(s) |x(s)| ds = \\ &= h_\xi(t) + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} s^{\alpha-1} \nu(s) s^{1-\alpha} |x(s)| ds, \end{aligned}$$

где

$$h_\xi(t) = \frac{|\xi| t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} \mu(s) ds.$$

Таким образом,

$$|Ax(t)| \leq h_\xi(t) + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} s^{\alpha-1} \nu(s) ds \|x\|_{1-\alpha}.$$

Из этого неравенства вытекает, что оператор  $A$  будет действовать в пространстве  $C_{1-\alpha}$ , если

$$\tilde{\mu}(t) = \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} \mu(s) ds \in C_{1-\alpha}, \quad \tilde{\nu}(t) = \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} s^{\alpha-1} \nu(s) ds \in C_{1-\alpha}, \tag{8}$$

или, что то же самое,

$$\int_0^t t^{1-\alpha} (t-s)^{\alpha-1} \mu(s) ds, \int_0^t t^{1-\alpha} (t-s)^{\alpha-1} s^{\alpha-1} \nu(s) ds \in C. \tag{9}$$

Примерами таких функций могут служить функции

$$\mu(t) = t^{-\beta} \quad (0 \leq \beta < 1), \quad \nu(t) = t^{-\gamma} \quad (0 \leq \gamma < \alpha).$$

**Л е м м а 1.** Пусть нелинейность  $f(t, u)$  удовлетворяет неравенству (7), причем функции  $\mu(t)$  и  $\nu(t)$  удовлетворяют условию (9).

Тогда оператор (5) действует в пространстве  $C_{1-\alpha}$  и ограничен:

$$\|Ax\|_{1-\alpha} \leq \|h_\xi(t)\|_{1-\alpha} + \|\tilde{\nu}(t)\|_0 \|x\|_{1-\alpha};$$

более того, этот оператор и вполне непрерывен.

Действие и ограниченность оператора (5) показана выше. Его непрерывность следует из непрерывности оператора суперпозиции  $fx(t) = f(t, x(t))$ , которая вытекает [2] из непрерывности нелинейности  $f(s, u)$ . Компактность этого оператора вытекает из компактности оператора  $I^\alpha$  [2; 3].

Напомним принцип Шаудера неподвижной точки в банаховом пространстве: Если  $A$  – вполне непрерывный оператор в банаховом пространстве  $X$ , оставляющий инвариантным ограниченное замкнутое выпуклое множество  $V \subset X$ , то он имеет в  $V$  по крайней мере одну неподвижную точку (т. е. уравнение  $x = Ax$  имеет в  $V$  по крайней мере одно решение  $x_* : x_* = Ax_*$ ).

Для применения данного принципа нас будут интересовать ограниченные замкнутые и выпуклые множества  $V \subset C_{1-\alpha}$

$$V = \{x(t) \in C_{1-\alpha} : |x(t)| \leq t^{\alpha-1}\nu(t)\} \quad (\nu(t) \in C).$$

Ограниченность, замкнутость и выпуклость этих множеств очевидна. Выясним, для каких  $\nu(t)$  соответствующее множество  $V$  инвариантно для  $A$ :  $AV \subseteq V$ .

Пусть нелинейность  $f(t, u)$  снова удовлетворяет неравенству (7):

$$|f(t, u)| \leq \mu(t) + \nu(t)|u| \quad (0 < t \leq T, -\infty < u < \infty),$$

где  $\mu(t)$  и  $\nu(t)$  – некоторые неотрицательные функции, для которых выполняется условие (9). Тогда при  $x \in C_{1-\alpha}$  и  $|x(t)| \leq t^{\alpha-1}\nu(t)$  выполняется неравенство

$$|f(t, x(t))| \leq \mu(t) + t^{\alpha-1}\nu(t)\nu(t) \quad (0 < t \leq T).$$

Отсюда

$$|Ax(t)| \leq \frac{|\xi|t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} (\mu(s) + s^{\alpha-1}\nu(s)\nu(s)) ds \quad (0 < t \leq T)$$

и, далее,

$$|Ax(t)| \leq \frac{|\xi|t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} \mu(s) ds + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} s^{\alpha-1} \nu(s)\nu(s) ds.$$

Из полученного неравенства вытекает, что оператор  $A$  оставляет множество  $V$  инвариантным, если для функции  $\nu(t)$  справедливо неравенство

$$\frac{|\xi|t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} \mu(s) ds + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} s^{\alpha-1} \nu(s)\nu(s) ds \leq t^{\alpha-1}\nu(t).$$

Будем искать такую функцию, как решение линейного интегрального уравнения Вольтерра второго рода

$$\nu(t) = t^{1-\alpha} h_\xi(t) + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t t^{1-\alpha} (t-s)^{\alpha-1} \nu(s)\nu(s) ds \quad (0 \leq t \leq T) \quad (10)$$

в пространстве  $C$  непрерывных функций.

**Л е м м а 2.** Пусть  $f(t, u)$  удовлетворяет неравенству (7), функции  $\mu(t)$  и  $\nu(t)$  удовлетворяют условиям (8). Тогда оператор  $A$ , определенный формулой (5), будет оставлять инвариантным множество  $V$ , определенное функцией  $\nu(t)$  ( $AV \subseteq V$ ), где  $\nu(t)$  – решение интегрального уравнения (10).

Из этой леммы и принципа Шаудера вытекает

**Т е о р е м а 1.** Пусть для правой части  $f(t, u)$  уравнения (1) выполняется ограничение (7). Тогда задача Коши (1)–(3) при любом  $\xi \in R$  имеет хотя бы одно решение  $x(t) \in C_{1-\alpha}$ .

Напомним принцип Банаха–Каччопполи неподвижной точки в полном метрическом пространстве: Если  $A$  – действующий в полном метрическом пространстве  $(M, \rho)$  оператор, удовлетворяющий условию Липшица  $\rho(Ax_1, Ax_2) \leq k\rho(x_1, x_2)$  ( $x_1, x_2 \in M$ ) с постоянной  $k < 1$ , то он имеет в  $M$  единственную неподвижную точку (т. е. уравнение  $x = Ax$  имеет в  $M$  единственное решение  $x_*$ :  $x_* = Ax_*$ ) и это решение является пределом последовательных приближений  $x_{n+1} = Ax_n$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) при любом  $x_0 \in M$ .

В качестве метрического пространства ниже рассматривается пространство  $(M, \rho)$ , в котором  $M = V$  ( $V$  – построенное выше инвариантное для  $A$  множество), а метрика  $\rho$  определяется ниже.

Пусть теперь функция  $f(s, u)$  удовлетворяет условию Липшица

$$|f(s, u_1) - f(s, u_2)| \leq \lambda(s) |u_1 - u_2| \quad (0 < s \leq T, -\infty < u_1, u_2 < \infty) \quad (11)$$

с некоторой неотрицательной функцией  $\lambda(s)$ . Пусть  $w(t)$  – непрерывная положительная функция на  $(0, T]$  и

$$\|x\|_w = \max_{0 < t \leq T} t^{1-\alpha} w(t) |x(t)|$$

– норма на пространстве  $C_{1-\alpha}$  (этой нормой определяется метрика  $\rho$ ).

Тогда

$$\begin{aligned} |Ax_1(t) - Ax_2(t)| &= \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} |f(s, x_1(s)) - f(s, x_2(s))| ds \leq \\ &\leq \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} \lambda(s) |x_1(s) - x_2(s)| ds = \\ &= \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} \lambda(s) s^{\alpha-1} w(s)^{-1} s^{1-\alpha} w(s) |x_1(s) - x_2(s)| ds, \end{aligned}$$

откуда, по определению нормы  $\|\cdot\|_w$ ,

$$\|Ax_1(t) - Ax_2(t)\|_w \leq \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \left\| \int_0^t t^{1-\alpha} w(t) (t-s)^{\alpha-1} \lambda(s) s^{\alpha-1} w(s)^{-1} ds \right\| \|x_1(t) - x_2(t)\|_w \quad (12)$$

(норма интегрального выражения  $\Pi$  берется в смысле пространства  $C$ ). Положим  $\omega(t) = \frac{1}{t^{1-\alpha} w(t)}$ . Тогда интегральное выражение  $\Pi$  можно переписать в виде

$$\Pi = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \omega^{-1}(t) \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} \lambda(s) \omega(s) ds.$$

Будем предполагать, что функция  $\lambda(t)$  такова, что интегральный оператор Вольтерра

$$J_\lambda^\alpha x(t) = \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} \lambda(s) x(s) ds \quad (13)$$

в пространстве  $C$  является вполне непрерывным. (В качестве примера  $\lambda(s)$  можно рассмотреть функцию  $\lambda(s) = s^{-\gamma}$  с  $0 \leq \gamma < \alpha$ .) Тогда его спектральный радиус равен нулю [4; 5]. Следовательно, при произвольном  $k \in (0, 1)$  интегральное уравнение

$$\frac{1}{k} + \frac{1}{k\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} \lambda(s) w(s) ds = w(t)$$

имеет решение  $w(t) \in C$ . Но тогда

$$\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \left\| \int_0^t t^{1-\alpha} w(t)(t-s)^{\alpha-1} \lambda(s) s^{\alpha-1} w(s)^{-1} ds \right\| \leq k,$$

и неравенство (12) с  $w(t) = \frac{1}{t^{\alpha-1} \omega(t)}$  примет вид

$$\|Ax_1(t) - Ax_2(t)\|_w \leq k \|x_1(t) - x_2(t)\|_w.$$

Иными словами, доказана

**Л е м м а 3.** Пусть  $f(t, u)$  удовлетворяет неравенству (11), функция  $\lambda(t)$  удовлетворяет условиям (13). Тогда оператор  $A$ , определенный формулой (5), будет оставлять инвариантным множество  $V$ , определенное функцией  $v(t)$  ( $AV \subseteq V$ ), где  $v(t)$  – решение интегрального уравнения (10) и на нем удовлетворяет условию Липшица с постоянной  $k < 1$  в норме  $\|\cdot\|_w$ .

Из этой леммы и принципа Шаудера вытекает

**Т е о р е м а 2.** Пусть правая часть  $f(t, u)$  уравнения (1) удовлетворяет неравенствам (7) и (11), причем операторы (8) и (13) компактны.

Тогда задача Коши (1)–(3) при любом  $\xi \in R$  имеет единственное решение  $x(t)$ , определенное на  $(0, T]$ .

Предыдущие рассуждения по стандартной схеме распространяются на дифференциальные уравнения дробного порядка с функциями, принимающими значения в банаховом пространстве, в частности, на системы уравнений.

Естественно возникает вопрос о возможности подобного рода рассуждений для других (не лиувилевских) производных дробного порядка.

Вопрос о разрешимости задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений с дробными производными Капуто рассматривался, например, в [6], где были получены условия существования и единственности решений задачи Коши для дифференциальных уравнений дробного порядка в банаховых пространствах с так называемыми ухудшающими правыми частями, где был предложен метод исследования разрешимости задачи Коши, основанный на исследовании сходимости метода последовательных приближений в шкалах банаховых пространств.

### Список использованных источников

1. Килбас, А. А. Теория и приложения дифференциальных уравнений дробного порядка / А. А. Килбас. – Самара, 2009. – 121 с.
2. Интегральные операторы в пространствах суммируемых функций / М. А. Красносельский [и др.]. – Москва: Наука, 1966. – 500 с.
3. Интегральные уравнения / П. П. Забрейко [и др.]. – Москва: Наука, 1968. – 448 с.
4. Забрейко, П. П. Об интегральных операторах Вольтерра / П. П. Забрейко // Успехи мат. наук. – 1967. – Т. 22, вып. 1. – С. 167–168.
5. Забрейко, П. П. О спектральном радиусе интегральных операторов Вольтерра / П. П. Забрейко // Литовский мат. сб. – 1967. – № 2. – С. 281–287.
6. Баркова, Е. А. Задача Коши для дифференциальных уравнений дробных порядков с ухудшающими правыми частями / Е. А. Баркова, П. П. Забрейко // Дифференц. уравнения. – 2006. – Т. 42, № 8. – С. 1132–1134.

### References

1. Kilbas A. A. *Theory and applications of fractional differential equations*. Samara, 2009. 121 p. (in Russian).
2. Krasnosel'skiy M. A., Zabreyko P. P., Pustyl'nik Ye. I., Sobolevskiy P. Ye. *Integral operators in spaces of summable functions*. Moscow, Nauka Publ., 1966. 500 p. (in Russian).
3. Zabreyko P. P., Koshelev A. I., Krasnosel'skiy M. A., Mikhlin S. G., Rakovshchik L. S., Stetsenko V. Ya. *Integral equations*. Moscow, Nauka Publ., 1968. 448 p. (in Russian).
4. Zabreyko P. P. Volterra integral operators. *Uspekhi matematicheskikh nauk = Russian Mathematical Surveys*, 1967, vol. 22, no. 1, pp. 167–168 (in Russian).

5 Zabreyko P. P. On the spectral radius of Volterra integral operators. *Litovskii matematicheskii sbornik = The Lithuanian Mathematical Collection*, 1967, no. 2, pp. 281–287 (in Russian).

6. Barkova E. A., Zabreiko P. P. The Cauchy problem for fractional differential equations with worsening right-hand sides. *Differential Equations*, 2006, vol. 42, no. 8, pp. 1199–1202. <https://doi.org/10.1134/s0012266106080143>

### Информация об авторах

*Забрейко Петр Петрович* – доктор физ.-мат. наук, профессор. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [zabreiko@mail.ru](mailto:zabreiko@mail.ru).

*Пономарева Светлана Владимировна* – канд. физ.-мат. наук, доцент. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [demyanko@bsu.by](mailto:demyanko@bsu.by).

### Information about the authors

*Zabreiko Petr Petrovich* – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [zabreiko@mail.ru](mailto:zabreiko@mail.ru).

*Ponomareva Svetlana Vladimirovna* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [demyanko@bsu.by](mailto:demyanko@bsu.by).

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 519.216.73

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-398-405>

Поступило в редакцию 22.06.2018

Received 22.06.2018

**М. М. Васьковский, И. В. Качан***Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь***АСИМПТОТИЧЕСКИЕ РАЗЛОЖЕНИЯ РЕШЕНИЙ СТОХАСТИЧЕСКИХ  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ  
С ДРОБНЫМИ БРОУНОВСКИМИ ДВИЖЕНИЯМИ***(Представлено академиком Н. А. Изобовым)*

**Аннотация.** Рассматриваются  $n$ -мерные стохастические дифференциальные уравнения с дробными броуновскими движениями, имеющими различные индексы Харста, большие  $1/3$ , и сносом. Получены асимптотические разложения математических ожиданий вида  $P_t g(x) = Eg(X_t^x)$  для достаточно малых  $t$ , где через  $X_t^x$  обозначается решение указанного уравнения с начальным значением  $x$ , а  $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  – достаточно гладкая функция.

**Ключевые слова:** дробное броуновское движение, потраекторный интеграл, производная Губинелли, стохастическое дифференциальное уравнение, асимптотическое разложение

**Для цитирования.** Васьковский, М. М. Асимптотические разложения решений стохастических дифференциальных уравнений с дробными броуновскими движениями / М. М. Васьковский, И. В. Качан // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 398–405. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-398-405>

**Maxim M. Vaskouski, Ilya V. Kachan***Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus***ASYMPTOTIC EXPANSIONS OF SOLUTIONS OF STOCHASTIC DIFFERENTIAL EQUATIONS DRIVEN  
BY MULTIVARIATE FRACTIONAL BROWNIAN MOTIONS***(Communicated by Academician Nikolai A. Izobov)*

**Abstract.** In this article,  $n$ -dimensional stochastic differential equations driven by multivariate fractional Brownian motions with the Hurst indices greater than  $1/3$  and a drift term are considered. We have obtained an expansion of expectations  $P_t g(x) = Eg(X_t^x)$  for small  $t$ , where  $X_t^x$  denotes the solution of the mentioned equation with an initial value  $x$ , and  $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  is a sufficiently smooth function.

**Keywords:** multivariate fractional Brownian motion, rough paths theory, Gubinelli's derivative, stochastic differential equation, asymptotic expansions

**For citation:** Vaskouski M. M., Kachan I. V. Asymptotic expansions of solutions of stochastic differential equations driven by multivariate fractional Brownian motions. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 398–405 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-398-405>

Рассмотрим стохастическое дифференциальное уравнение

$$dX_t = f(X_t)dB_t, t \in [0, T], \quad (1)$$

в котором  $f = (f_0, \dots, f_d)$ ,  $f_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $i = 0, \dots, d$ , – достаточно гладкие функции с ограниченными производными;  $B_t = (B_t^{(0)}, \dots, B_t^{(d)})^T$ ,  $B_t^{(0)} = t$ ,  $B_t^{(i)}$ ,  $i = 0, \dots, d$ , – независимые одномерные дробные броуновские движения с индексами Харста  $H_i \in (1/3, 1)$ ,  $H_0 = 1$ , заданные на вероятностном пространстве  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ . Через  $X_t^x$  будем обозначать решение уравнения (1) с начальным условием  $X_0 = x \in \mathbb{R}^n$ .

Цель настоящей работы состоит в получении асимптотических разложений для математических ожиданий вида  $P_t g(x) = Eg(X_t^x)$  для достаточно малых  $t$ . Асимптотические формулы для операторов  $P_t$ , связанных с уравнением (1), были получены в работах [1] и [2] в случае, когда  $H_1 = \dots = H_d > 1/3$ . Результаты, полученные в настоящей работе, позволяют охватить случай различных индексов Харста  $H_i > 1/3$  и уравнений (1) со сносом.

Для любых банаховых пространств  $U_1, U_2, U$  будем обозначать через  $C_b^k(U_1, U_2)$  пространство функций  $\varphi : U_1 \rightarrow U_2$ , имеющих непрерывные и ограниченные производные до порядка  $k$  включительно, а через  $C^\alpha([0, T], U)$  – пространство функций, непрерывных по Гельдеру с показателем  $\alpha \in (0, 1]$ . Для обозначения норм в указанных пространствах будем использовать символы  $\|\cdot\|_{C_b^k}$  и  $\|\cdot\|_\alpha$  соответственно, кроме того, через  $\|\cdot\|_\infty$  будем обозначать максимум-норму. Выделим также класс  $C_2^\alpha([0, T]^2, U_2)$  функций двух переменных  $R(s, t) = R_{s,t}$ , принимающих значения в  $U_2$ , для которых существует константа  $C$  такая, что  $|R_{s,t}| \leq C |t - s|^\alpha$  для всех  $(s, t) \in [0, T]^2$ . Наименьшую такую константу также будем обозначать через  $\|R\|_\alpha = \sup_{s,t \in [0, T], s \neq t} \frac{|R_{s,t}|_{U_2}}{|t - s|^\alpha}$ . Отметим, что для функции  $Z$  класса  $C^\alpha([0, T], U_1)$  можно определить приращения  $Z_{s,t} = Z_t - Z_s$ ,  $(s, t) \in [0, T]^2$ , принадлежащие пространству  $C_2^\alpha([0, T], U_1)$ . Поэтому мы будем также использовать обозначение  $Z_{s,t}$  для соответствующих приращений функции одной переменной  $Z_t$ .

Под решением уравнения (1) мы будем понимать случайный процесс  $X_t$ , заданный на вероятностном пространстве  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  и удовлетворяющий почти наверное интегральному уравнению

$$X_t = X_0 + \int_s^t f(X_r) dB_r, \quad t \in [0, T],$$

в котором интеграл в правой части понимается как потраекторный (определение потраекторного интеграла и ряда связанных с ним определений приведено в [2–4]). Решение  $X_t$  с начальным условием  $X_0 = x \in \mathbb{R}^n$  будем называть единственным (почти наверное), если для любого другого решения  $Y_t$  уравнения (1) с начальным условием  $Y_0 = x \in \mathbb{R}^n$  выполняется равенство  $P(X_t = Y_t \forall t \in [0, T]) = 1$ .

Путем тривиального обобщения теоремы 8.4 [3] может быть получено условие существования и единственности решения  $X_t$  уравнения (1) с начальным условием  $X_0 = x \in \mathbb{R}^n$ : достаточно, чтобы функция  $f$  принадлежала пространству  $C_b^3(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^{n \times (d+1)})$ . Более того, если имеют место включения  $f \in C_b^3(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^{n \times (d+1)})$ ,  $\varphi \in C_b^3(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$ , то, как показано в [5], почти наверное справедлив следующий аналог формулы Ито:

$$\varphi(X_t) = \varphi(X_s) + \int_s^t D\varphi(X_r) f(X_r) dB_r, \quad s, t \in [0, T]. \tag{2}$$

Далее будем придерживаться следующих обозначений:

$$\Delta^k[0, t] = \{(t_1, \dots, t_k) \in [0, 1]^k : 0 \leq t_1 < \dots < t_k \leq t\}, \quad k \in \mathbb{N},$$

$$\int_{\Delta^k[0, t]} dB^{(I_k)} = \int_0^t \int_0^{t_1} \dots \int_0^{t_{k-1}} dB_{t_1}^{(i_1)} \dots dB_{t_{k-1}}^{(i_{k-1})} dB_{t_k}^{(i_k)},$$

$$I_k = (i_1, \dots, i_k) \in \{0, \dots, d\}^k,$$

$$D_f^{(i)} = \sum_{j=1}^n f_{i,j}(\cdot) \frac{\partial}{\partial x_j}, \quad D_f^{(I_k)} = D_f^{(i_1)} \dots D_f^{(i_k)},$$

$$P_t g(x) = E g(X_t^x), \quad t \geq 0.$$

В дальнейшем для краткости мы будем опускать индекс  $x$  у решения  $X_t^x$ .

**Т е о р е м а.** Пусть функции  $f, g$  принадлежат пространствам  $C_b^{N+2}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^{n \times (d+1)})$ ,  $C_b^{N+3}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$  соответственно,  $N \in \mathbb{N}$ . Тогда для любого фиксированного  $H \in (1/3, 1/2]$  такого, что  $H < \min_{i=0, \dots, d} H_i$ , справедливо следующее равенство

$$P_t g(x) = g(x) + \sum_{k=1}^N \sum_{I_k \in \{0, \dots, d\}^k} t^{|H_{I_k}|} (D_f^{(I_k)} g)(x) E \left( \int_{\Delta^k[0, t]} dB^{(I_k)} \right) + O(t^{(N+1)H}), \quad t \in [0, T], \tag{3}$$

в котором  $|H_{I_k}| = H_{i_1} + H_{i_2} + \dots + H_{i_k}$  – сумма индексов Харста дробных броуновских движений  $B^{(i_1)}, B^{(i_2)}, \dots, B^{(i_k)}$ .

Доказательство. Применяя  $N+1$  раз формулу Ито (2), получим

$$g(X_t) = g(x) + \sum_{k=1}^N \sum_{I_k \in \{0, \dots, d\}^k} (D_f^{(I_k)} g)(x) \int_{\Delta^k [0, t]} dB^{(I_k)} + \\ + \sum_{I_{N+1} \in \{0, \dots, d\}^{N+1}} \int_0^t \int_0^{t_{N+1}} \dots \int_0^{t_2} (D_f^{(I_{N+1})} g)(X_{t_1}) dB_{t_1}^{(i_1)} \dots dB_{t_N}^{(i_N)} dB_{t_{N+1}}^{(i_{N+1})}. \quad (4)$$

Введем обозначение  $\varphi_{I_{N+1}}(x) = (D_f^{(I_{N+1})} g)(x)$  и преобразуем последнее слагаемое в (4). Воспользуемся свойством самоподобия дробного броуновского движения: процесс  $\widehat{B}_u^{(ij|c)} = c^{H_{ij}} B_{u/c}^{(ij)}$  также является дробным броуновским движением с индексом Харста  $H_{ij}$  для любого  $c > 0$ ,  $j = \overline{1, N+1}$ ,  $i_j \neq 0$ . Следовательно, при фиксированном  $t \in [0, T]$  имеем

$$\int_0^t \int_0^{t_{N+1}} \dots \int_0^{t_2} \varphi_{I_{N+1}}(X_{t_1}) dB_{t_1}^{(i_1)} \dots dB_{t_N}^{(i_N)} dB_{t_{N+1}}^{(i_{N+1})} = \\ = \int_0^1 dB_{tt_{N+1}}^{(i_{N+1})} \int_0^{t_{N+1}} dB_{tt_N}^{(i_N)} \dots \int_0^{t_2} \varphi_{I_{N+1}}(X_{tt_1}) dB_{tt_1}^{(i_1)} \stackrel{\mathcal{L}}{=} \\ \stackrel{\mathcal{L}}{=} \int_0^1 d\widehat{B}_{tt_{N+1}}^{(i_{N+1}|t)} \int_0^{t_{N+1}} d\widehat{B}_{tt_N}^{(i_N|t)} \dots \int_0^{t_2} \varphi_{I_{N+1}}(\widehat{X}_{tt_1}^{(t)}) d\widehat{B}_{tt_1}^{(i_1|t)} = \\ = t^{H_{i_1} + \dots + H_{i_{N+1}}} \int_0^1 dB_{t_{N+1}}^{(i_{N+1})} \int_0^{t_{N+1}} dB_{t_N}^{(i_N)} \dots \int_0^{t_2} \varphi_{I_{N+1}}(\widehat{X}_{tt_1}^{(t)}) dB_{t_1}^{(i_1)}, \quad (5)$$

где знак  $\stackrel{\mathcal{L}}{=}$  означает совпадение распределений, а  $\widehat{X}_\tau^{(t)}$  – решение уравнения

$$d\widehat{X}_\tau^{(t)} = f(\widehat{X}_\tau^{(t)}) d\widehat{B}_\tau^{(t)}, \quad \tau \in [0, T]$$

с начальным условием  $\widehat{X}_0^{(t)} = x$  (здесь  $\widehat{B}_\tau^{(t)} = (\widehat{B}_\tau^{(0|t)}, \widehat{B}_\tau^{(1|t)}, \dots, \widehat{B}_\tau^{(d|t)})^T$ ). Аналогично получаем равенство

$$\int_{\Delta^k [0, t]} dB^{(I_k)} \stackrel{\mathcal{L}}{=} t^{|H_{I_k}|} \int_{\Delta^k [0, 1]} dB^{(I_k)}, \quad (6)$$

а посему из (4)–(6) после взятия математического ожидания получим

$$P_t g(x) = g(x) + \sum_{k=1}^N \sum_{I_k \in \{0, \dots, d\}^k} t^{|H_{I_k}|} (D_f^{(I_k)} g)(x) E \left( \int_{\Delta^k [0, 1]} dB^{(I_k)} \right) + \mathcal{R}_{N+1}(t),$$

где

$$\mathcal{R}_{N+1}(t) = \sum_{I_{N+1} \in \{0, \dots, d\}^{N+1}} t^{|H_{I_{N+1}}|} E \int_0^1 \int_0^{t_{N+1}} \dots \int_0^{t_2} (D_f^{(I_{N+1})} g)(\widehat{X}_{tt_1}^{(t)}) dB_{t_1}^{(i_1)} \dots dB_{t_N}^{(i_N)} dB_{t_{N+1}}^{(i_{N+1})}.$$

Поскольку справедливо неравенство  $|H_{I_{N+1}}| \geq (N+1)H$  для любого  $I_{N+1}$ , то при  $t < 1$  имеем

$$|\mathcal{R}_{N+1}(t)| \leq (d+1)^{N+1} t^{(N+1)H} \times \\ \times \max_{I_{N+1} \in \{0, \dots, d\}^{N+1}} E \left| \int_0^1 \int_0^{t_{N+1}} \dots \int_0^{t_2} (D_f^{(I_{N+1})} g)(\widehat{X}_{tt_1}^{(t)}) dB_{t_1}^{(i_1)} \dots dB_{t_N}^{(i_N)} dB_{t_{N+1}}^{(i_{N+1})} \right|.$$

Таким образом, для завершения доказательства формулы (3) осталось установить справедливость неравенства

$$E \left| \int_0^1 \int_0^{t_{N+1}} \dots \int_0^{t_2} (D_f^{(I_{N+1})} g)(\widehat{X}_{tt_1}^{(t)}) dB_{t_1}^{(i_1)} \dots dB_{t_N}^{(i_N)} dB_{t_{N+1}}^{(i_{N+1})} \right| < \infty \quad (7)$$

для любых индексов  $I_{N+1} = (i_1, \dots, i_{N+1}) \in \{0, \dots, d\}^{N+1}$ .

Рассмотрим кратные интегралы чуть более общего вида, нежели (7):

$$\mathcal{I}_t^{(k)} = \int_0^t \int_0^{t_{k-1}} \dots \int_0^{t_1} \varphi(\widehat{X}_{cr}^{(c)}) dB_r^{(i_1)} \dots dB_{t_{k-2}}^{(i_{k-2})} dB_{t_{k-1}}^{(i_{k-1})}, \quad t \in [0, 1], \quad c \in (0, 1].$$

Для единообразия положим  $I_t^{(0)} = \varphi(\widehat{X}_{ct}^{(c)})$ .

**Л е м м а.** Пусть  $\varphi$  имеет непрерывные и ограниченные производные до 2-го порядка включительно. Тогда справедливы неравенства  $|\mathcal{I}_{s,t}^{(k)} - \mathcal{I}_s^{(k-1)} B_{s,t}^{(i)}| \leq M_k |t-s|^{2H}$  для любого  $i = \overline{0, d}$  и  $|\mathcal{I}_{s,t}^{(k)}| \leq \widetilde{M}_k |t-s|^H$ , где  $M_k, \widetilde{M}_k$  – случайные величины (не зависящие от  $s, t$ ).

**Д о к а з а т е л ь с т в о.** Проведем его индукцией по  $k$ .

Рассмотрим  $k=1$ . Докажем равенство  $(\varphi(\widehat{X}_{c\cdot}^{(c)}))' = c^{H_{i_1}} D\varphi(\widehat{X}_{c\cdot}^{(c)}) (\widehat{X}_{c\cdot}^{(c)})'_{c\cdot}$ . Действительно, имеем следующее соотношение:

$$\begin{aligned} R_{s,t}^{\varphi(\widehat{X}_{c\cdot}^{(c)})|_{i_1}} &:= \varphi(\widehat{X}_{ct}^{(c)}) - \varphi(\widehat{X}_{cs}^{(c)}) - c^{H_{i_1}} D\varphi(\widehat{X}_{cs}^{(c)}) (\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)})'_{cs} B_{s,t}^{(i_1)} = [c^{H_{i_1}} B_{s,t}^{(i_1)} = \widehat{B}_{cs,ct}^{(i_1|c)}] = \\ &= \varphi(\widehat{X}_{ct}^{(c)}) - \varphi(\widehat{X}_{cs}^{(c)}) - D\varphi(\widehat{X}_{cs}^{(c)}) \widehat{X}_{cs,ct}^{(c)} + D\varphi(\widehat{X}_{cs}^{(c)}) R_{cs,ct}^{\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}}|_{i_1} = \\ &= \frac{1}{2} D^2 \varphi(\widehat{X}_{cs}^{(c)} + \theta \widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}) \widehat{X}_{cs,ct}^{(c)} \otimes \widehat{X}_{cs,ct}^{(c)} + D\varphi(\widehat{X}_{cs}^{(c)}) R_{cs,ct}^{\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}}|_{i_1} \end{aligned}$$

для некоторого  $\theta \in (0, 1)$  ввиду разложения в ряд Тейлора. Здесь  $R_{cs,ct}^{\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}}|_{i_1} = \widehat{X}_{u,v}^{(c)} - (\widehat{X}_{u,v}^{(c)})'_u \widehat{B}_{u,v}^{(i_1|c)}$  – остаток для  $\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}$ ; из теоремы 8.4 [3] следует, что  $\|R_{cs,ct}^{\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}}|_{i_1}\|_{2H} \leq \|R_{cs,ct}^{\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}}\|_{2H} < \infty$ . Легко установить справедливость соотношения

$$\begin{aligned} \left| R_{s,t}^{\varphi(\widehat{X}_{c\cdot}^{(c)})|_{i_1}} \right| &\leq \frac{1}{2} \|D^2 \varphi\|_{\infty} \|\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}\|_H^2 |ct - cs|^{2H} + \|D\varphi\|_{\infty} \left\| R_{cs,ct}^{\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}}|_{i_1} \right\|_{2H} |ct - cs|^{2H} = \\ &= c^{2H} \left( \frac{1}{2} \|D^2 \varphi\|_{\infty} \|\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}\|_H^2 + \|D\varphi\|_{\infty} \left\| R_{cs,ct}^{\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}}|_{i_1} \right\|_{2H} \right) |t-s|^{2H}. \end{aligned}$$

Из него следуют неравенства  $\left\| R_{s,t}^{\varphi(\widehat{X}_{c\cdot}^{(c)})|_{i_1}} \right\|_{2H} \leq \frac{1}{2} \|D^2 \varphi\|_{\infty} \|\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}\|_H^2 + \|D\varphi\|_{\infty} \left\| R_{cs,ct}^{\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}}|_{i_1} \right\|_{2H} < \infty$ .

Далее, поскольку  $(\varphi(\widehat{X}_{c\cdot}^{(c)}))' = c^{H_{i_1}} D\varphi(\widehat{X}_{c\cdot}^{(c)}) (\widehat{X}_{c\cdot}^{(c)})'_{c\cdot} = c^{H_{i_1}} D\varphi(\widehat{X}_{c\cdot}^{(c)}) f(\widehat{X}_{c\cdot}^{(c)})$ , то

$$\begin{aligned} \left| (\varphi(\widehat{X}_{c\cdot}^{(c)}))'_{s,t} \right| &= c^{H_{i_1}} |(D\varphi f)(\widehat{X}_{ct}^{(c)}) - (D\varphi f)(\widehat{X}_{cs}^{(c)})| = \\ &= c^{H_{i_1}} \left| D(D\varphi f)(\widehat{X}_{cs}^{(c)} + \theta \widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}) \right| \widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}| = \\ &= c^{H_{i_1}+H} (\|D^2 \varphi\|_{\infty} \|f\|_{\infty} + \|D\varphi\|_{\infty} \|Df\|_{\infty}) \|\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}\|_H |t-s|^H. \end{aligned}$$

Отсюда следуют оценки  $\|\varphi(\widehat{X}_{c\cdot}^{(c)})'\|_H \leq (\|D^2 \varphi\|_{\infty} \|f\|_{\infty} + \|D\varphi\|_{\infty} \|Df\|_{\infty}) \|\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}\|_H < \infty$ .

Принимая во внимание неравенство теоремы 4.10 [3], будем иметь соотношение

$$\begin{aligned} \left| \int_s^t \varphi(\widehat{X}_{c\cdot}^{(c)}) dB_r^{(i_1)} - \varphi(\widehat{X}_{cs}^{(c)}) B_{s,t}^{(i_1)} \right| &\leq c^{H_{i_1}} \|D\varphi\|_{\infty} \|f\|_{\infty} \|\mathbb{B}^{(i_1)}\|_{2H} |t-s|^{2H} + \\ &+ C \left( \|B^{(i_1)}\|_H \|R_{s,t}^{\varphi(\widehat{X}_{c\cdot}^{(c)})|_{i_1}}\|_{2H} + \|\mathbb{B}^{(i_1)}\|_{2H} \|\varphi(\widehat{X}_{c\cdot}^{(c)})'\|_H \right) |t-s|^{3H} \leq M_1 |t-s|^{2H}, \\ M_1 &= (C(\|D^2 \varphi\|_{\infty} \|f\|_{\infty} + \|D\varphi\|_{\infty} \|Df\|_{\infty}) \|\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}\|_H + \|D\varphi\|_{\infty} \|f\|_{\infty}) \|\mathbb{B}\|_{2H} + \\ &+ C \left( \frac{1}{2} \|D^2 \varphi\|_{\infty} \|\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}\|_H^2 + \|D\varphi\|_{\infty} \left\| R_{cs,ct}^{\widehat{X}_{cs,ct}^{(c)}}|_{i_1} \right\|_{2H} \right) \|B\|_H. \end{aligned}$$

Итак, получили необходимое неравенство  $|\mathcal{I}_{s,t}^{(1)} - \mathcal{I}_s^{(0)} B_{s,t}^{(i_1)}| \leq M_1 |t-s|^{2H}$ , как и утверждалось. Из доказанного следует справедливость соотношения

$$\begin{aligned} |\mathcal{I}_{s,t}^{(1)}| &\leq |\mathcal{I}_s^{(0)}| \|B_{s,t}^{(i_1)}\| + M_1 |t-s|^{2H} \leq \\ &\leq (\|\varphi\|_\infty \|B\|_H + M_1) |t-s|^H =: \widetilde{M}_1 |t-s|^H. \end{aligned}$$

Легко видеть, что случайные величины  $M_1, \widetilde{M}_1$  не зависят от  $s, t$  и  $i_1$ .

Рассмотрим теперь  $k=2$ . Используя неравенство теоремы 4.10 [3], оценку для  $\mathcal{I}^{(1)}$  и рекуррентное соотношение  $\mathcal{I}_t^{(k)} = \int_0^t \mathcal{I}_r^{(k-1)} dB_r^{(i_k)}$ ,  $(\mathcal{I}^{(1)})' = \mathcal{I}^{(0)}$ , получим неравенства

$$\begin{aligned} & \left| \mathcal{I}_{s,t}^{(2)} - \mathcal{I}_s^{(1)} B_{s,t}^{(i_2)} \right| \leq \left| (\mathcal{I}^{(1)})'_s \mathbb{B}_{s,t}^{(i_2)} \right| + \\ & + C(\|B^{(i_2)}\|_H \|(\mathcal{I}^{(1)})_{s,t} - (\mathcal{I}^{(1)})'_s B_{s,t}^{(i_2)}\|_{2H} + \|\mathbb{B}^{(i_2)}\|_{2H} \|(\mathcal{I}^{(1)})'\|_H) |t-s|^{3H} \leq \\ & \leq \|\varphi\|_\infty \|\mathbb{B}\|_{2H} |t-s|^{2H} + C(M_1 \|B\|_H + \|\mathbb{B}\|_{2H} c^{H i_1} \|D\varphi\|_\infty \|\widehat{X}^{(c)}\|_H) |t-s|^{2H} \leq M_2 |t-s|^{2H}, \\ & M_2 = (\|\varphi\|_\infty + C \|D\varphi\|_\infty \|\widehat{X}^{(c)}\|_H) \|\mathbb{B}\|_{2H} + CM_1 \|B\|_H. \end{aligned}$$

Оценка же на  $\|\mathcal{I}^{(0)}\|_H$  была получена с помощью формулы конечных приращений

$$\mathcal{I}_{s,t}^{(0)} = \varphi(\widehat{X}_{ct}^{(c)}) - \varphi(\widehat{X}_{cs}^{(c)}) = D\varphi(\widehat{X}_{cs}^{(c)} + \theta(\widehat{X}_{ct}^{(c)} - \widehat{X}_{cs}^{(c)}))(\widehat{X}_{ct}^{(c)} - \widehat{X}_{cs}^{(c)}).$$

Как и в случае  $k=1$ , отсюда получаем соотношения  $|\mathcal{I}_{s,t}^{(2)}| \leq (\widetilde{M}_1 \|B\|_H + M_2) |t-s|^H =: \widetilde{M}_2 |t-s|^H$ , поскольку ввиду  $\mathcal{I}_s^{(1)} = \mathcal{I}_{0,s}^{(1)}$ ,  $s^H < 1$ :

$$|\mathcal{I}_{s,t}^{(2)} - \mathcal{I}_s^{(1)} B_{s,t}^{(i_2)}| \geq |\mathcal{I}_{s,t}^{(2)}| - |\mathcal{I}_{0,s}^{(1)}| \|B_{s,t}\| \geq |\mathcal{I}_{s,t}^{(2)}| - \|\mathcal{I}^{(1)}\|_H \|B\|_H |t-s|^H.$$

Легко видеть, что случайные величины  $M_2, \widetilde{M}_2$  не зависят от  $s, t$  и  $i_2$ .

Предположим, что утверждение выполнено для всех натуральных чисел, меньших  $k$ , и докажем его для  $k+1$ . По предположению индукции из теоремы 4.10 [3] будут следовать неравенства

$$\begin{aligned} & \left| \mathcal{I}_{s,t}^{(k+1)} - \mathcal{I}_s^{(k)} B_{s,t}^{(i_{k+1})} - \mathcal{I}_s^{(k-1)} \mathbb{B}_{s,t}^{(i_{k+1})} \right| \leq \\ & \leq C(\|B^{(i_{k+1})}\|_H \|\mathcal{I}_{s,t}^{(k)} - \mathcal{I}_s^{(k-1)} B_{s,t}^{(i_{k+1})}\|_{2H} + \|\mathbb{B}^{(i_{k+1})}\|_{2H} \|\mathcal{I}^{(k-1)}\|_H) |t-s|^{3H} \leq \\ & \leq C(M_k \|B\|_H + \widetilde{M}_{k-1} \|\mathbb{B}\|_{2H}) |t-s|^{2H}. \end{aligned}$$

В то же время справедливы соотношения

$$\begin{aligned} & \left| \mathcal{I}_{s,t}^{(k+1)} - \mathcal{I}_s^{(k)} B_{s,t}^{(i_{k+1})} - \mathcal{I}_s^{(k-1)} \mathbb{B}_{s,t}^{(i_{k+1})} \right| \geq \left| \mathcal{I}_{s,t}^{(k+1)} - \mathcal{I}_s^{(k)} B_{s,t}^{(i_{k+1})} \right| - \left| \mathcal{I}_{0,s}^{(k-1)} \right| \|\mathbb{B}_{s,t}^{(i_{k+1})}\| \geq \\ & \geq \left| \mathcal{I}_{s,t}^{(k+1)} - \mathcal{I}_s^{(k)} B_{s,t}^{(i_{k+1})} \right| - \widetilde{M}_{k-1} \|\mathbb{B}\|_{2H} |t-s|^{2H}. \end{aligned}$$

Таким образом, устанавливаем оценку

$$\left| \mathcal{I}_{s,t}^{(k+1)} - \mathcal{I}_s^{(k)} B_{s,t}^{(i_{k+1})} \right| \leq M_{k+1} |t-s|^{2H},$$

где  $M_{k+1} = (C+1) \|\mathbb{B}\|_{2H} \widetilde{M}_{k-1} + C \|B\|_H M_k$ . Осталось заметить, что из справедливых неравенств

$$M_{k+1} |t-s|^H \geq \left| \mathcal{I}_{s,t}^{(k+1)} - \mathcal{I}_s^{(k)} B_{s,t}^{(i_{k+1})} \right| \geq \left| \mathcal{I}_{s,t}^{(k+1)} \right| - \left| \mathcal{I}_{0,s}^{(k)} \right| \|B_{s,t}^{(i_{k+1})}\| \geq \left| \mathcal{I}_{s,t}^{(k+1)} \right| - \widetilde{M}_k \|B\|_H |t-s|^H$$

окончательно следует оценка

$$\left| \mathcal{I}_{s,t}^{(k+1)} \right| \leq (M_{k+1} + \widetilde{M}_k \|B\|_H) |t-s|^H =: \widetilde{M}_{k+1} |t-s|^H.$$

Легко видеть, что случайные величины  $M_{k+1}, \widetilde{M}_{k+1}$  не зависят от  $s, t$  и  $i_{k+1}$ . Лемма доказана.

Вернемся к оценке интегралов  $\mathcal{I}_k$ . Из леммы, в частности, следуют соотношения

$$(\mathcal{I}^{(k)})' = \mathcal{I}^{(k-1)}, R_{s,t}^{\mathcal{I}^{(k)}} = \mathcal{I}_{s,t}^{(k)} - \mathcal{I}_s^{(k-1)} B_{s,t}^{(i)}, \|R_{s,t}^{\mathcal{I}^{(k)}}\|_{2H} \leq M_k, \|\mathcal{I}^{(k)}\|_H \leq \widetilde{M}_k,$$

а также  $\|\mathcal{I}^{(k)}\|_\infty \leq \widetilde{M}_k$ , поскольку  $\max_{t \in [0,1]} |\mathcal{I}_t^{(k)}| = \max_{t \in [0,1]} |\mathcal{I}_{0,t}^{(k)}|$ .

Очевидная индукция по  $k$  показывает, что величины

$$M_k = M_k(\|B\|_H, \|\mathbb{B}\|_{2H}, \|\widehat{X}^{(c)}\|_H, \|R^{\widehat{X}^{(c)}}\|_{2H}), \widetilde{M}_k = \widetilde{M}_k(\|B\|_H, \|\mathbb{B}\|_{2H}, \|\widehat{X}^{(c)}\|_H, \|R^{\widehat{X}^{(c)}}\|_{2H})$$

являются многочленами с постоянными положительными коэффициентами, причем нормы  $\|B\|_H, \|\mathbb{B}\|_{2H}, \|\widehat{X}^{(c)}\|_H, \|R^{\widehat{X}^{(c)}}\|_{2H}$  входят в одночлены в степенях не выше  $k, k, 2, 1$  соответственно. Пусть  $\widetilde{\gamma}_k$  – максимальный коэффициент многочлена  $\widetilde{M}_k(\|B\|_H, \|\mathbb{B}\|_{2H}, \|\widehat{X}^{(c)}\|_H, \|R^{\widehat{X}^{(c)}}\|_{2H})$  и пусть

$$E(\|B\|_H^{i_1} \|\mathbb{B}\|_{2H}^{i_2} \|\widehat{X}^{(c)}\|_H^{j_1} \|R^{\widehat{X}^{(c)}}\|_{2H}^{j_2}) = \max_{\substack{i,i'=0,k, \\ j=0,1,2,j'=0,1}} E(\|B\|_H^{i_1} \|\mathbb{B}\|_{2H}^{i'_1} \|\widehat{X}^{(c)}\|_H^{j_1} \|R^{\widehat{X}^{(c)}}\|_{2H}^{j'_1}).$$

Взяв супремум и математическое ожидание от обеих частей неравенства  $|\mathcal{I}_{s,t}^{(k)}| \leq \widetilde{M}_k |t-s|^H$ , получим оценку

$$\sup_{0 \leq s < t \leq 1} E |\mathcal{I}_{s,t}^{(k)}| \leq E \widetilde{M}_k \leq 2k^2 \widetilde{\gamma}_k E(\|B\|_H^{i_1} \|\mathbb{B}\|_{2H}^{i_2} \|\widehat{X}^{(c)}\|_H^{j_1} \|R^{\widehat{X}^{(c)}}\|_{2H}^{j_2}).$$

Из неравенства Коши–Буняковского следует справедливость неравенства

$$\begin{aligned} E(\|B\|_H^{i_1} \|\mathbb{B}\|_{2H}^{i_2} \|\widehat{X}^{(c)}\|_H^{j_1} \|R^{\widehat{X}^{(c)}}\|_{2H}^{j_2}) &\leq \\ &\leq (E \|B\|_H^{4i_1} E \|\mathbb{B}\|_{2H}^{4i_2} E \|\widehat{X}^{(c)}\|_H^{4j_1} E \|R^{\widehat{X}^{(c)}}\|_{2H}^{4j_2})^{1/4}. \end{aligned}$$

Таким образом, получаем оценку

$$\begin{aligned} E \sup_{0 \leq s < t \leq 1} \left| \int_s^t \int_0^{t_{k-1}} \dots \int_0^{t_1} \varphi(\widehat{X}_{cr}^{(c)}) dB_r^{(i_1)} \dots dB_{t_{k-2}}^{(i_{k-2})} dB_{t_{k-1}}^{(i_{k-1})} \right| &\leq \\ &\leq 2k^2 \widetilde{\gamma}_k (E \|B\|_H^{4i_1} E \|\mathbb{B}\|_{2H}^{4i_2} E \|\widehat{X}^{(c)}\|_H^{4j_1} E \|R^{\widehat{X}^{(c)}}\|_{2H}^{4j_2})^{1/4}. \end{aligned} \tag{8}$$

Согласно [6], любой момент порядка  $p \geq 1$  случайной величины  $\|B\|_H$  конечен; в частности, конечен момент  $E \|B\|_H^{4i_1}$ . То же верно и для случайной величины  $\|\mathbb{B}\|_{2H}$  (см. [3, теорема 10.5]), т. е., в частности,  $E \|\mathbb{B}\|_{2H}^{4i_2} < \infty$ .

Из доказательства предложения 8.3 [3] следует, что существуют универсальные положительные постоянные  $c_1, c_2$ , такие, что выполняются неравенства

$$\|\widehat{X}^{(c)}\|_H \leq c_1 \left( \|\widehat{B}^{(c)}\|_H + \|\widehat{\mathbb{B}}^{(c)}\|_{2H}^{1/2} + \|\widehat{B}^{(c)}\|_H^{1/H} + \|\widehat{\mathbb{B}}^{(c)}\|_{2H}^{1/(2H)} \right), \tag{9}$$

$$\|R^{\widehat{X}^{(c)}}\|_{2H} \leq c_2 \left( \|\widehat{B}^{(c)}\|_H^2 + \|\widehat{\mathbb{B}}^{(c)}\|_{2H} + \|\widehat{B}^{(c)}\|_H^{1+\frac{1}{H}} + \|\widehat{\mathbb{B}}^{(c)}\|_{2H}^{\frac{1+\frac{1}{2H}}{2}} \right). \tag{10}$$

Таким образом, оценки (9) и (10) означают, что моменты  $E \|\widehat{X}^{(c)}\|_H^{4j_1}, E \|R^{\widehat{X}^{(c)}}\|_{2H}^{4j_2}$  конечны. Тогда, очевидно, и правая часть (8) конечна. Теорема доказана.

**З а м е ч а н и е.** Рассмотрим случай, когда все показатели Харста  $H_i, i = 1, \dots, d$ , равны  $1/2$ . В этом случае уравнение (1) можно рассматривать как уравнение Стратоновича. Учитывая связь

уравнений Ито и Стратоновича [7, предложение 2.4], данное уравнение можно свести к уравнению Ито

$$dX_t = \tilde{f}_0(X_t)dt + \hat{f}(X_t)dW_t, \quad (11)$$

где  $\hat{f}$  – матрица, составленная из вектор-столбцов  $f_1, \dots, f_d$ ;  $W_t$  –  $d$ -мерное броуновское движение,

$$\tilde{f}_0(X) = f_0(X) - \text{col}(\rho_1(X), \dots, \rho_n(X)),$$

$$\rho_j(X) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\partial \hat{f}_{ji}(X)}{\partial x_k} \hat{f}_{ki}(X).$$

Так как решение уравнения (11) обладает марковским свойством [8, теорема 7.1.2], то, полагая  $N = 2$  в соотношении (3), получим, что семейство операторов  $P_t$  является  $C_0$ -полугруппой с генератором

$$\mathcal{A} = \sum_{j=1}^n \tilde{f}_{0,j}(\cdot) \frac{\partial}{\partial x_j} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^d \left( \sum_{j=1}^n f_{k,j}(\cdot) \frac{\partial}{\partial x_j} \right)^2.$$

Таким образом, для функции  $u(x, t) = P_t g(x)$  получаем обратное уравнение Колмогорова

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \mathcal{A}u.$$

Отметим, что даже для простейшего одномерного уравнения  $dX_t = dB_t^\alpha$  при  $\alpha \in (1/3, 1/2) \cup (1/2, 1)$  решение  $X_t = B_t^\alpha$  не является семимартингалом, и следовательно, не обладает марковским свойством, которое является ключевым при выводе уравнений Колмогорова [8, теорема 8.1.1].

### Список использованных источников

1. Baudoin, F. Operators associated with a stochastic differential equation driven by fractional Brownian motions / F. Baudoin, L. Coutin // *Stochastic Processes and their Applications*. – 2007. – Vol. 117, N 5. – P. 550–574. <https://doi.org/10.1016/j.spa.2006.09.004>
2. Trees and asymptotic expansions for fractional stochastic differential equations / A. Neuenkirch [et al.] // *Annales de l'Institut Henri Poincaré, Probabilités et Statistiques*. – 2009. – Vol. 45, N 1. – P. 157–174. <https://doi.org/10.1214/07-aihp159>
3. Friz, P. *A Course on Rough Paths with an introduction to regularity structures* / P. Friz, M. Hairer. – Springer, 2014. – 263 p.
4. Gubinelli, M. Controlling rough paths / M. Gubinelli / *J. Funct. Anal.* – 2004. – Vol. 216, N 1. – P. 86–140. <https://doi.org/10.1016/j.jfa.2004.01.002>
5. Васьковский, М. М. Аналог формулы Ито для стохастических дифференциальных уравнений с дробными броуновскими движениями, имеющими различные индексы Харста, большие  $1/3$  / М. М. Васьковский, И. В. Качан // *Аналитические и численные методы моделирования естественно-научных и социальных проблем*. – Пенза, 2017. – С. 12–16.
6. Nualart, D. Differential equations driven by fractal Brownian motion / D. Nualart, A. Rascanu // *Collectanea Mathematica*. – 2002. – Vol. 53, N 1. – P. 55–81.
7. Леваков, А. А. *Стохастические дифференциальные уравнения* / А. А. Леваков. – Минск: БГУ, 2009. – 231 с.
8. Оксендаль, Б. *Стохастические дифференциальные уравнения. Введение в теорию и приложения* / Б. Оксендаль; пер. с англ. – М.: Мир, 2003. – 408 с.

### References

1. Baudoin F., Coutin L. Operators associated with a stochastic differential equation driven by fractional Brownian motions. *Stochastic Processes and their Applications*, 2007, vol. 117, no. 5, pp. 550–574. <https://doi.org/10.1016/j.spa.2006.09.004>
2. Neuenkirch A., Nourdin I., Röbler A., Tindel S. Trees and asymptotic expansions for fractional stochastic differential equations. *Annales de l'Institut Henri Poincaré, Probabilités et Statistiques*, 2009, vol. 45, no. 1, pp. 157–174. <https://doi.org/10.1214/07-aihp159>
3. Friz P., Hairer M. *A Course on Rough Paths with an introduction to regularity structures*. Springer International Publishing Switzerland, 2014. 263 p.

4. Gubinelli M. Controlling rough paths. *Journal of Functional Analysis*, 2004, vol. 216, no. 1, pp. 86–140. <https://doi.org/10.1016/j.jfa.2004.01.002>
5. Vaskouski M. M., Kachan I. V. An analogue of the Ito formula for stochastic differential equations with fractional Brownian motions having different Hurst indices greater than 1/3. *Analiticheskie i chislennye metody modelirovaniya estestvenno-nauchnykh i sotsial'nykh problem* [Analytical and numerical methods of modeling of natural-scientific and social problems]. Penza, 2017, pp. 12–16 (in Russian).
6. Nualart D., Rascanu A. Differential equations driven by fractional Brownian motion. *Collectanea Mathematica*, 2002, vol. 53, no. 1, pp. 55–81.
7. Levakov A. A. *Stochastic Differential Equations*. Minsk, Belarusian State University, 2009. 231 p. (in Russian).
8. Oksendal B. *Stochastic differential equations. An introduction with applications*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 2003. 379 p.

### Информация об авторах

*Васьковский Максим Михайлович* – канд. физ.-мат. наук, доцент. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vaskovskii@bsu.by.

*Качан Илья Вадимович* – магистрант, ассистент кафедры. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ilyakachan@gmail.com.

### Information about the authors

*Vaskouski Maxim Mikhailovich* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate professor. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vaskovskii@bsu.by.

*Kachan Ilya Vadimovich* – Undergraduate, Assistant of the Department. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ilyakachan@gmail.com.

**ФИЗИКА**  
**PHYSICS**УДК 517.958:537.311.1; 621.315.592  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-406-414>Поступило в редакцию 16.07.2018  
Received 16.07.2018**Н. А. Поклонский, С. А. Вырко, А. И. Ковалев***Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь***ТЕРМИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ АКТИВАЦИИ ПРЫЖКОВОЙ  
 $\varepsilon_2$ -ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПО АТОМАМ БОРА  
В СЛАБО КОМПЕНСИРОВАННОМ КРЕМНИИ***(Представлено членом-корреспондентом И. О. Троянчуком)*

**Аннотация.** Рассматривается изоляторная сторона концентрационного фазового перехода изолятор–металл (перехода Мотта) в легированных акцепторами (атомами бора) кристаллах кремния *p*-типа в условиях стационарной прыжковой электрической проводимости. Атомы бора замещают в кристаллической решетке атомы кремния и могут находиться в одном из трех зарядовых состояний (–1, 0, +1), а компенсирующая примесь (доноры) находится в зарядовом состоянии (+1). Распределение атомов примесей по кристаллу предполагается случайным (пуассоновским). Из уровней энергии атомов бора в зарядовых состояниях (0) и (–1) формируется  $A^0$ -зона, а из уровней энергии атомов бора в зарядовых состояниях (+1) и (0) формируется  $A^+$ -зона. Рассчитывается уменьшение энергии активации  $\varepsilon_2$  термически ассистированных туннельных переходов (прыжков) дырок между электрически нейтральными атомами бора, т. е. находящимися в зарядовых состояниях (0). Величина  $\varepsilon_2$  примерно равна энергетической ширине щели между  $A^0$ - и  $A^+$ -зонами, т. е. щели Хаббарда. В квазиклассическом приближении показано, что сужение энергетической щели между  $A^0$ - и  $A^+$ -зонами происходит вследствие: 1) формирования из возбужденных квантовых состояний атомов бора в зарядовом состоянии (0) квазинепрерывной зоны разрешенных значений энергии для дырок  $v$ -зоны, так что величина смещения потолка  $v$ -зоны в глубь запрещенной зоны определяется максимальным радиусом орбиты дырки в атоме бора, не превышающим половины среднего расстояния между ближайшими атомами примесей, 2) расщепления основных (невозбужденных) уровней энергии «молекулярных» пар атомов бора в зарядовых состояниях (0) на триплетное и синглетное состояния двух дырок. Расчеты  $\varepsilon_2$  без подгоночных параметров количественно согласуются с имеющимися экспериментальными данными для *p*-Si:B.

**Ключевые слова:** легированный бором кремний, трехзарядные двухуровневые акцепторы, прыжковая миграция дырок, термическая энергия активации, расщепление уровней энергии акцепторов

**Для цитирования:** Поклонский, Н. А. Термическая энергия активации прыжковой  $\varepsilon_2$ -электропроводности по атомам бора в слабо компенсированном кремнии / Н. А. Поклонский, С. А. Вырко, А. И. Ковалев // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 406–414. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-406-414>

**Nikolai A. Poklonski, Sergey A. Vyrko, Alexander I. Kovalev***Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus***THERMAL ACTIVATION ENERGY OF HOPPING  $\varepsilon_2$ -CONDUCTION VIA BORON ATOMS  
IN WEAKLY COMPENSATED SILICON***(Communicated by Corresponding Member Igor O. Troyanchuk)*

**Abstract.** The insulating side of the concentration insulator–metal phase transition (Mott’s transition) in *p*-type silicon crystals doped with acceptor (boron atoms) is considered under the conditions of stationary hopping electrical conduction. The boron atoms substitute silicon atoms in the crystal lattice and can be in one of the three charge states (–1, 0, +1), while the compensating impurity (donors) is in the charge state (+1). The distribution of impurity atoms is supposed to be random (Poisson’s distribution). The  $A^0$ -band is formed from the energy levels of boron atoms in the charge states (0) and (–1), while

the  $A^+$ -band is formed from the energy levels of boron atoms in the charge states (+1) and (0). The decrease in the activation energy  $\varepsilon_2$  of thermally assisted tunneling transitions (hops) of holes between electrically neutral boron atoms, i. e. boron atoms that are in the charge state (0), is calculated. The  $\varepsilon_2$  quantity is approximately equal to an energy gap between  $A^0$ - and  $A^+$ -bands, i. e. Hubbard's gap. In the quasi-classical approximation it is shown that the narrowing of the energy gap between  $A^0$ - and  $A^+$ -bands occurs due to: (i) the formation of a quasi-continuous band of allowed energy values for  $\nu$ -band holes from excited quantum states of boron atoms in the charge state (0), thus the value of the  $\nu$ -band shift into the band gap is determined by a maximum radius of the hole orbit in a boron atom, which does not exceed the half of the average distance between the nearest impurity atoms, and (ii) the splitting of the ground (non-excited) energy levels of the "molecular" pairs of boron atoms in the charge states (0) into triplet and singlet states of two holes. Calculations of  $\varepsilon_2$  without any adjustable parameters are quantitatively agree with the known experimental data on  $p$ -Si:B.

**Keywords:** boron doped silicon, triple-charged two-level acceptors, hopping migration of holes, thermal activation energy, splitting of acceptor energy levels

**For citation:** Poklonski N. A., Vyrko S. A., Kovalev A. I. Thermal activation energy of hopping  $\varepsilon_2$ -conduction via boron atoms in weakly compensated silicon. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 406–414 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-406-414>

**Введение.** При описании состояний и процессов в ковалентных полупроводниковых кристаллах  $p$ -типа для достаточно низких температур принимают, что наряду с делокализованными состояниями дырок (т. е. электронных вакансий, квазичастиц) в  $\nu$ -зоне, имеются и частично локализованные состояния дырок на атомах акцепторной примеси. Дырки перемещаются между акцепторами путем термически активированных (ассистированных) туннельных переходов, что и определяет прыжковую проводимость.

Поясним используемые далее термины [1]. Термическая энергия ионизации (активации) акцептора – это энергия, необходимая для диссоциации связанного состояния дырки на акцепторе при данной температуре вследствие тепловых флуктуаций в кристаллической матрице. Оптическая энергия ионизации – минимальная энергия фотона, необходимая для перевода дырки из связанного (локализованного) состояния на акцепторе в делокализованное состояние  $\nu$ -зоны кристалла при фиксированном локализуемом дырку потенциале (вследствие принципа Франка–Кондона [2]). Ясно, что термическая энергия активации меньше оптической энергии ионизации акцептора. Боровский радиус орбиты дырки электрически нейтрального водородоподобного акцептора – это характерный размер области кристаллической матрицы, в пределах которой волновая функция (орбиталь) дырки не мала экспоненциально.

На рис. 1 показана схема двух уровней энергии ( $E_b > 0$  и  $E_t > 0$ ) трехзарядных акцепторов (атомов бора) в запрещенной энергетической зоне кремния. Уровни энергии  $E_b$  и  $E_t$  – это центры  $A^0$ - и  $A^+$ -зон атомов бора в кремнии.

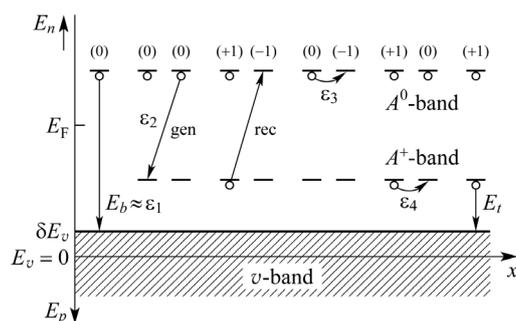


Рис. 1. Схема двух уровней энергии ( $E_b > 0$  и  $E_t > 0$ ) трехзарядных атомов бора в окрестности потолка  $\nu$ -зоны кристаллического кремния. Стрелками показаны переходы дырок (светлые кружки), приводящие к изменению зарядовых состояний атомов бора. Заполненные электронами состояния  $\nu$ -зоны заштрихованы; за начало отсчета энергии дырок  $E_p$  выбран потолок  $\nu$ -зоны нелегированного кремния ( $E_v = 0$ );  $x$  – ось декартовой системы координат;  $\delta E_v < 0$  – порог подвижности дырок  $\nu$ -зоны (сдвиг потолка  $\nu$ -зоны  $E_v = 0$  в глубину запрещенной зоны);  $E_F$  – уровень Ферми (химический потенциал);  $E_n$  – одноэлектронная энергия

Fig. 1. Scheme of two energy levels ( $E_b > 0$  and  $E_t > 0$ ) of triple-charged boron atoms in the vicinity of the top of the  $\nu$ -band of crystalline silicon. Arrows show the transitions of holes (light circles), which lead to the change in the charge states of boron atoms. The states of the  $\nu$ -band filled with electrons are hatched; the reference point of the energy of holes  $E_p$  is the top of the  $\nu$ -band of the undoped silicon ( $E_v = 0$ );  $x$  is the axis of the Cartesian coordinate system;  $\delta E_v < 0$  is the mobility threshold for  $\nu$ -band holes (shift of the top of the  $\nu$ -band  $E_v = 0$  into the band gap);  $E_F$  is the Fermi level (chemical potential);  $E_n$  is the single-electron energy

Рассмотрим кристаллический кремний  $p$ -типа, легированный атомами бора и слабо компенсированный донорами. Условие электрической нейтральности кристаллического образца имеет вид

$$N_{-1} = N_{+1} + KN, \quad (1)$$

где  $N = N_{-1} + N_0 + N_{+1}$  – концентрация атомов бора в трех зарядовых состояниях ( $-1, 0, +1$ );  $KN$  – концентрация доноров, целиком находящихся в зарядовом состоянии ( $+1$ );  $0 < K < 1$  – степень компенсации бора донорами;  $(1 + K)N$  – концентрация атомов всех примесей. Все атомы примесей считаются неподвижными, но зарядовые состояния атомов бора мигрируют по кристаллу за счет прыжков между ними дырок. Концентрация атомов бора, соответствующая (при температуре  $T \rightarrow 0$ ) фазовому переходу изолятор–металл (переходу Мотта), для  $K \ll 1$  в кремнии составляет  $N_M \approx 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (см. [3] и цитируемую там литературу). Далее безразмерный параметр Мотта определяется так:  $a_H[(1 + K)N]^{1/3}$ , где  $a_H$  – боровский радиус легирующей водородоподобной примеси в зарядовом состоянии (0).

Феноменологически температурная зависимость удельной электропроводности  $\sigma$  трехмерных образцов  $p$ -Si:B на постоянном токе при умеренном легировании бором ( $N < N_M$ ) представляется в виде (см., напр., [4]):

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_{01} \exp\left(-\frac{\varepsilon_1}{k_B T}\right) + \sigma_{02} \exp\left(-\frac{\varepsilon_2}{k_B T}\right) + \sigma_{03} \exp\left(-\frac{\varepsilon_3}{k_B T}\right), \quad (2)$$

где электропроводность  $\sigma_1$  обусловлена переходами дырок с акцепторов в зарядовых состояниях (0) в  $\nu$ -зону,  $\sigma_2$  определяется переходами дырок между электрически нейтральными акцепторами (переходами одиночных дырок из  $A^0$ - в  $A^+$ -зону),  $\sigma_3$  связана с термически активированными туннельными переходами (прыжками) дырок в  $A^0$ -зоне с акцепторов в зарядовых состояниях (0) на акцепторы в зарядовых состояниях ( $-1$ ); предэкспоненциальные множители  $\sigma_{01}$ ,  $\sigma_{02}$ ,  $\sigma_{03}$  – электропроводности, слабо зависящие от температуры (по сравнению с соответствующими экспонентами);  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$  – энергии термической активации электропроводностей  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  дырок в окрестности температур, где доминируют указанные выше механизмы электропроводности;  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

Экспериментальную температурную зависимость  $\sigma_2$  получают в соответствии с (2) вычитанием из электрической проводимости  $\sigma$  зонной  $\sigma_1$  и прыжковой  $\sigma_3$  проводимостей, которые четче, чем  $\sigma_2$ , аппроксимируются прямыми линиями в полупологарифмическом аррениусовском масштабе ( $\ln \sigma - 1/T$ ). (Отметим, что, как правило, интегральная энергия термической активации  $\varepsilon_2(T) = -k_B T \ln(\sigma_2 / \sigma_{02})$  уменьшается при понижении температуры, и кажущаяся линейность зависимости  $\ln \sigma_2$  от  $1/T$  зачастую обусловлена лишь узостью анализируемого интервала температур (см., напр., [5]).)

Прыжковая электропроводность  $\sigma_2$  обусловлена прыжками дырок с акцепторов в зарядовом состоянии (0) на ближайшие к ним по расстоянию акцепторы в зарядовом состоянии (0). Последующая миграция дырок осуществляется в  $A^0$ -зоне с энергией активации  $\varepsilon_3$  и в  $A^+$ -зоне – с энергией активации  $\varepsilon_4$ . Измерения величины  $\sigma_2$  обычно проводятся при фиксированном внешнем давлении  $P$ , температуре  $T$  и постоянном числе акцепторов  $NV$  в кристаллическом образце кремния объемом  $V$ . В этих условиях выражение для  $\sigma_2$  по аналогии с уравнением Аррениуса можно представить в виде (см., напр., [1]):

$$\sigma_2 = \sigma_{02} \exp[-(h_2 - s_2 T) / k_B T], \quad (3)$$

где  $h_2(T) = \varepsilon_2(T) + P\nu_2(T)$  – средняя по объему  $V$  образца энтальпия;  $\varepsilon_2(T)$  – средняя энергия, необходимая для реализации элементарного акта термически активированного туннелирования дырки между двумя акцепторами в зарядовых состояниях (0);  $\nu_2(T)$  – среднее изменение «объема» двух электрически нейтральных акцепторов при прыжке между ними дырки;  $s_2(T)$  – средняя колебательная (тепловая) энтропия активации прыжков дырки; конфигурационный вклад в энтропию дырок на акцепторах практически не зависит от температуры, и поэтому включен в предэкспоненциальный множитель  $\sigma_{02}$ .

Температурные зависимости величин  $\varepsilon_2(T)$ ,  $\nu_2(T)$  и  $s_2(T)$  связаны уравнением (см., напр., [1; 6])

$$T(\partial s_2 / \partial T)_{P,NV} = (\partial \varepsilon_2 / \partial T)_{P,NV} + P(\partial \nu_2 / \partial T)_{P,NV} \quad (4)$$

Из (3) при учете (4) получаем

$$-k_B[\partial \ln(\sigma_2 / \sigma_{02}) / \partial (1 / T)]_{P,NV} = h_2(T) = \varepsilon_2(T) + P\nu_2(T), \quad (5)$$

т. е. производная по  $1 / T$  от логарифма отношения  $\sigma_2 / \sigma_{02}$  пропорциональна энтальпии  $h_2(T)$  термической активации прыжковой  $\varepsilon_2$ -электропроводности.

Водородоподобные акцепторы в ковалентных кристаллических матрицах являются «жесткими» точечными дефектами [1], так что  $E_b > E_t$  и имеет место неравенство  $P\nu_2(T) \ll \varepsilon_2(T)$ . Тогда по соотношению (5) энтальпия активации прыжков дырок между акцепторами  $h_2(T)$  равна термической энергии активации  $\varepsilon_2(T)$ .

Далее исследуется термическая энергия активации  $\varepsilon_2$  переходов дырок между  $A^0$ - и  $A^+$ -зонами Хаббарда атомов бора в кристаллах кремния  $p$ -типа, для которых отношение концентрации компенсирующей примеси (доноров) к концентрации легирующей примеси (бора)  $K \ll 1$ .

Цель работы – учет при расчете  $\varepsilon_2$  двух факторов: 1) ограничения числа возможных возбужденных состояний электрически нейтральных легирующих примесей (акцепторов), 2) разности уровней энергии триплетного и синглетного состояний двух дырок в паре ближайших по расстоянию акцепторов в зарядовом состоянии (0) при расчете  $\varepsilon_2$  (в [4; 7] учет этих двух факторов в величине  $\varepsilon_2$  производился порознь). Конкретно, ниже проведен квазиклассический расчет уменьшения ширины энергетической щели Хаббарда между  $A^0$ - и  $A^+$ -зонами в слабо компенсированном кремнии при увеличении концентрации атомов бора. Считается, что возбужденные квантовые состояния имеют только атомы бора в зарядовом состоянии (0).

**Модель концентрационного сужения щели Хаббарда.** При прыжковой  $\sigma_2$ -электропроводности (формула (2), рис. 1) дырка вначале термически возбуждается с акцептора в зарядовом состоянии (0) на ближайший акцептор в зарядовом состоянии (0), так что эти акцепторы переходят в зарядовые состояния (–1) и (+1). Далее дырка либо возвращается обратно, либо зарядовые состояния (–1) и (+1) посредством термически ассистированного туннелирования дырок мигрируют с энергиями активации  $\varepsilon_3$  и  $\varepsilon_4$  по кристаллу.

Следуя [4], энергию термической ионизации (активации) электрически нейтрального акцептора (из основного, невозбужденного квантового состояния) в кристаллической матрице со статической диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$  запишем в виде

$$E_b = I_b \left( 1 - \frac{1}{l_m^2} \right) = I_b \left( 1 - 2 \frac{a_H}{d_{im}} \right) = I_b - \delta E_\nu, \quad (6)$$

где  $I_b = I_H$  – энергия термической ионизации уединенного акцептора в зарядовом состоянии (0) из основного квантового состояния (переход дырки с электрически нейтрального акцептора в  $\nu$ -зону); число  $l_m$  определяется из ограничения (конфайнмента) максимально возможного радиуса орбиты дырки на акцепторе  $l_m^2 a_H = d_{im} / 2$  половиной среднего расстояния между ближайшими атомами примесей (акцепторов с концентрацией  $N$  и доноров с концентрацией  $KN$ )  $d_{im} = 0,554[(1 + K)N]^{-1/3}$ ;  $a_H = e^2 / 8\pi\varepsilon I_b$  – боровский радиус;  $e$  – элементарный заряд;  $\varepsilon_0 = 8,85$  пФ/м – электрическая постоянная;  $\delta E_\nu$  – сдвиг потолка  $\nu$ -зоны в глубь запрещенной зоны кристалла из-за перекрытия орбиталей дырок возбужденных состояний акцепторов в зарядовых состояниях (0) (рис. 2).

Тогда согласно [4] с учетом (6) энергия термической ионизации акцептора в зарядовом состоянии (+1) принимает вид

$$E_t = 0,055E_b = I_t \left( 1 - 2 \frac{a_H}{d_{im}} \right), \quad (7)$$

где  $I_t = 0,055I_b$  – энергия нейтрализации уединенного акцептора в зарядовом состоянии (+1) (соответствует переходу дырки с атома бора в зарядовом состоянии (+1) в  $\nu$ -зону).

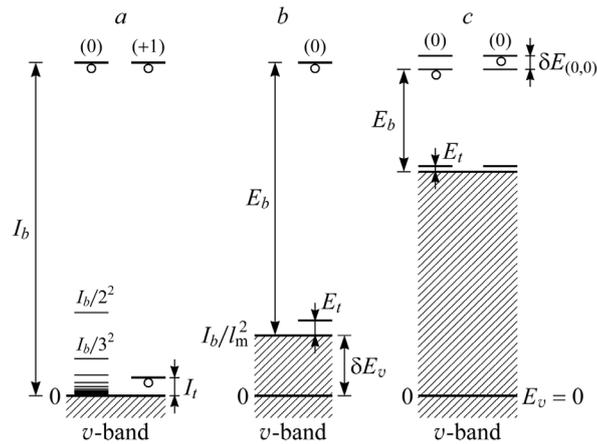


Рис. 2. Схема изменения положения уровней энергии  $E_b$  и  $E_t = 0,055E_b$  атомов бора (как акцепторов) в запрещенной зоне кремния относительно потолка  $v$ -зоны  $E_v + \delta E_v$  при увеличении их концентрации:  $a$  – уединенные атомы бора в зарядовых состояниях (0) и (+1) с энергиями ионизации  $I_b = I_H$  и  $I_t = 0,055I_b$  при слабом легировании, светлые кружки – дырки;  $b$  – ограничение максимально возможного радиуса орбитали дырки ( $l_m^2 a_H = d_{im} / 2$ ) на акцепторе в зарядовом состоянии (0);  $c$  – расщепление  $\delta E_{(0,0)}$  уровней энергии двух акцепторов в зарядовых состояниях (0) на расстоянии  $d_{im}$  при сильном легировании;  $\delta E_v$  – сдвиг потолка  $v$ -зоны из-за перекрытия орбит дырок возбужденных состояний акцепторов в зарядовых состояниях (0)

Fig. 2. Scheme of change of positions of energy levels  $E_b$  and  $E_t = 0,055E_b$  of boron atoms (as acceptors) in the band gap of silicon relative to the top of the  $v$ -band  $E_v + \delta E_v$  with their concentration:  $a$  – solitary boron atoms in the charge states (0) and (+1) with ionization energies  $I_b = I_H$  and  $I_t = 0,055I_b$  under light doping, light circles are holes;  $b$  – confinement of maximum allowed radius of hole orbital ( $l_m^2 a_H = d_{im} / 2$ ) on acceptor in the charge state (0);  $c$  – splitting  $\delta E_{(0,0)}$  of energy levels of two acceptors in the charge states (0) positioned at the distance  $d_{im}$  under heavy doping;  $\delta E_v$  is the shift of the  $v$ -band due to the overlapping of hole orbits of excited states of acceptors in the charge states (0)

Здесь отметим, что при вычислении расстояния  $d_{im}$  от данного атома примеси до ближайшего (первого) соседа все примеси рассматривались как газ точечных частиц в кристаллической матрице [8].

На рис. 2 показана схема изменения положения уровней энергии  $E_b$  и  $E_t$  атомов бора в зарядовых состояниях (0) и (+1) (центров  $A^0$ - и  $A^+$ -зон; см. рис. 1) в запрещенной зоне кремния при увеличении их концентрации.

Отметим, что (6) и (7) отражают «конфайнмент» максимально возможного диаметра орбиты дырки на атоме бора в зарядовом состоянии (0) ближайшими к нему по расстоянию атомами бора (основной примесью) и компенсирующими их донорами.

Разность уровней энергии  $E_b$  и  $E_t$  при увеличении концентрации основной примеси и степени ее компенсации уменьшается:

$$E_b - E_t = (I_b - I_t) \left( 1 - 2 \frac{a_H}{d_{im}} \right).$$

При увеличении концентрации бора происходит расщепление уровней энергии  $\delta E$  в парах бор–бор (т. е. в «молекулярных» парах по терминологии [7]), расположенных в среднем на расстоянии  $d_{im}$ . Рассмотрим три случая молекулярных пар атомов бора в зарядовых состояниях (0, -1), (0, 0) и (+1, 0).

1) По аналогии с разностью уровней энергии основного и возбужденного состояний электрона в молекуле  $H_2^+$  [9] запишем расщепление уровней энергии двух акцепторов в зарядовых состояниях (0) и (-1), находящихся на расстоянии  $d_{im} = \rho a_H$ , в виде

$$\delta E_{(0,-1)} = \frac{2(JS - B)}{1 - S^2},$$

где  $J = -2I_H[1 - \exp(-2\rho)(1 + \rho)] / \rho$ ;  $B = -2I_H(1 + \rho)\exp(-\rho)$ ;  $S = \exp(-\rho)(1 + \rho + \rho^2 / 3)$ ;  $\rho = d_{im} / a_H = 2l_m^2$ ;  $d_{im} = 0,554[(1 + K)N]^{-1/3}$ ;  $I_H = I_b = e^2 / 8\pi\epsilon a_H > 0$  – энергия ионизации акцептора в зарядовом состоянии (0);  $a_H$  – боровский радиус – мера пространственной протяженности основного квантового состояния электрически нейтрального акцептора.

2) По аналогии с разностью уровней энергии триплетного и синглетного спиновых состояний двух электронов в молекуле  $H_2$  [10] запишем расщепление уровней энергии двух акцепторов в зарядовых состояниях (0), находящихся на расстоянии  $d_{im} = \rho a_H$ , в виде

$$\delta E_{(0,0)} = \frac{2(QS^2 - A)}{1 - S^4}, \tag{8}$$

где  $Q = 2I_H \frac{1}{\rho} \exp(-2\rho) \left( 1 + \frac{5}{8}\rho - \frac{3}{4}\rho^2 - \frac{1}{6}\rho^3 \right)$ ,  $S = \exp(-\rho)(1 + \rho + \rho^2/3)$ ,

$$A = 2I_H \left\{ \frac{S^2}{\rho} \left[ 1 + \frac{6}{5}(\gamma + \ln \rho) \right] - \exp(-2\rho) \left( \frac{11}{8} + \frac{103}{20}\rho + \frac{49}{15}\rho^2 + \frac{11}{15}\rho^3 \right) + \frac{6M}{5\rho} [M \text{Ei}(-4\rho) - 2S \text{Ei}(-2\rho)] \right\},$$

$\gamma = 0,57722$ ,  $M = \exp(\rho)(1 - \rho + \rho^2/3)$ ,  $\text{Ei}(x) = -\int_{-x}^{\infty} t^{-1} \exp(-t) dt$ .

Согласно (8) величина  $\delta E_{(0,0)}$  есть разность энергий триплетного и синглетного спиновых состояний двух дырок на двух акцепторах. (Спиновый магнитный момент дырки равен спиновому магнитному моменту электрона.)

3) По аналогии с разностью уровней энергии возбужденного и основного состояний трех электронов в молекулярном ионе  $H_2^-$  [7; 11] запишем расщепление уровней энергии двух акцепторов в зарядовых состояниях (+1) и (0), находящихся на расстоянии  $d_{im} = \rho a_H$ , в виде

$$\delta E_{(+1,0)} = E_g - E_u,$$

$$E_g = 0,0368 I_H \exp(-1,4886\rho);$$

$$E_u = 4,2 I_H \{ \exp[-1,7773(\rho - 2,33)] - 2 \exp[-0,88865(\rho - 2,33)] \}.$$

Отметим, что  $\delta E_{(+1,0)}$  есть разность уровней энергии возбужденного (четного, g) и основного (нечетного, u) квантовых состояний трех дырок на двух акцепторах.

На рис. 3 показана зависимость расщепления уровней энергии  $\delta E$  «молекулярных» пар акцепторов (пар атомов бора) в зарядовых состояниях (0)–(–1), (0)–(0) и (+1)–(0) от безразмерного параметра Мотта  $a_H[(1 + K)N]^{1/3}$ . Из рисунка видно, что при равных значениях параметра  $a_H[(1 + K)N]^{1/3}$  величина  $\delta E_{(0,-1)}$ , обусловленная конечностью времени локализации дырки на акцепторе в зарядовом состоянии (0) относительно прыжкового перехода на акцептор в зарядовом состоянии (–1), больше, чем величина  $\delta E_{(+1,0)}$ , обусловленная конечностью времени локализации дырки на акцепторе в зарядовом состоянии (+1) относительно прыжкового перехода на акцептор в зарядовом состоянии (0). Величина  $\delta E_{(0,0)}$  относится к энергии активации  $\varepsilon_2$ , а величины  $\delta E_{(0,-1)}$  и  $\delta E_{(+1,0)}$  относятся к энергиям активации  $\varepsilon_3$  и  $\varepsilon_4$  соответственно (см. также рис. 1).

Из рис. 1 и (2) видно, что в величине энергии термической активации  $\varepsilon_2$  электропроводности  $\sigma_2$  как бы «скрыты» энергии термической активации  $\varepsilon_4$  и  $\varepsilon_3$  прыжков дырок в  $A^+$ - и  $A^0$ -зоне соответственно. С учетом того, что расчеты [12] величины  $\varepsilon_4 \approx \varepsilon_3$  для  $K \ll 1$  все еще не находят экспериментальной поддержки, далее использовались экспериментальные данные  $\varepsilon_2 - \varepsilon_3$ .

**Результаты и их обсуждение.** Рассчитывалась величина  $\varepsilon_2 - \varepsilon_4$ , где  $\varepsilon_4$  – энергия термической активации прыжковой проводимости в  $A^+$ -зоне между акцепторами в зарядовых состояниях (+1) и (0), примерно равная энергии активации  $\varepsilon_3$  миграции дырок в  $A^0$ -зоне между акцепторами в зарядовых состояниях (0) и (–1). Конкретно расчет энергии активации  $\varepsilon_2 - \varepsilon_3$  проводился с учетом (6)–(8) по формуле

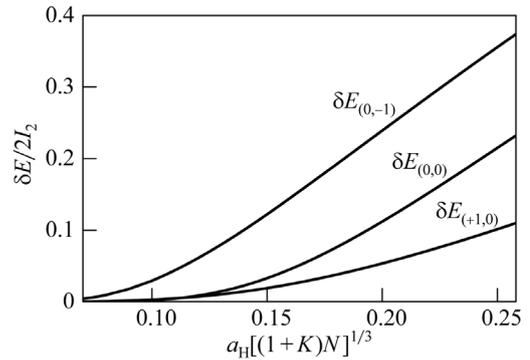


Рис. 3. Зависимость расщепления уровней энергии  $\delta E$  в единицах  $2I_2 = 2(I_b - I_l) = 1,89I_b$  от параметра Мотта  $a_H[(1 + K)N]^{1/3}$  для молекулярных пар акцепторов:  $\delta E_{(0,-1)}$  соответствует зарядовым состояниям (0,–1),  $\delta E_{(0,0)}$  – (0,0) и  $\delta E_{(+1,0)}$  – (+1,0)

Fig. 3. Dependence of energy level splitting  $\delta E$  in the units of  $2I_2 = 2(I_b - I_l) = 1.89I_b$  on the Mott parameter  $a_H[(1 + K)N]^{1/3}$  for molecular pairs of acceptors:  $\delta E_{(0,-1)}$  corresponds to the charge states (0,–1),  $\delta E_{(0,0)}$  corresponds to the charge states (0,0), and  $\delta E_{(+1,0)}$  corresponds to the charge states (+1,0)

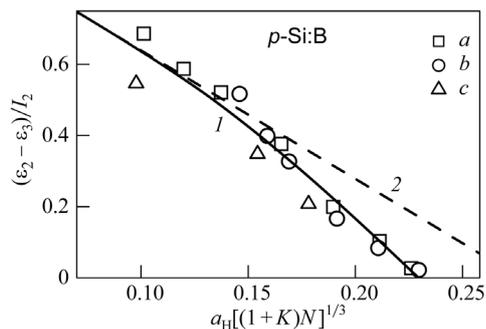


Рис. 4. Зависимость термической энергии активации  $\varepsilon_2 - \varepsilon_3$  (в единицах  $I_2 = 0,945I_b$ ) от параметра Мотта  $a_H[(1 + K)N]^{1/3}$  для атомов бора в кремнии. Линии – расчет по (9) для степени компенсации бора донорами  $K = 0,01$  с учетом (1) и без учета (2) синглет-триплетного расщепления  $\delta E_{(0,0)}$  уровней энергии двух атомов бора в зарядовых состояниях (0) по (8);  $a_H$  – радиус орбитали дырки уединенного атома бора в зарядовом состоянии (0). Точки – экспериментальные значения  $\varepsilon_2 - \varepsilon_3$  из работ: *a* [13], *b* [14] и *c* [15]

Fig. 4. Dependence of thermal activation energy  $\varepsilon_2 - \varepsilon_3$  (in the units of  $I_2 = 0,945I_b$ ) on the Mott parameter  $a_H[(1 + K)N]^{1/3}$  for boron atoms in silicon. Lines are the calculation using Eq. (9) for compensation ratio of boron by donors  $K = 0,01$  taking into account (1) and without taking into account (2) of singlet-triplet splitting  $\delta E_{(0,0)}$  of energy levels of two boron atoms in the charge states (0) by Eq. (8);  $a_H$  is the radius of hole orbital of a solitary boron atom in the charge state (0). Points are the experimental values of  $\varepsilon_2 - \varepsilon_3$  from the works: *a* [13], *b* [14], and *c* [15]

пенсированном кремнии. Образование  $A^0$ - и  $A^+$ -зон обусловлено возможностью каждому атому бора (как примеси замещения в кристаллическом кремнии) пребывать в одном из трех зарядовых состояний  $(-1, 0, +1)$ . Рассматриваются концентрации бора вплоть до концентраций, соответствующих низкотемпературному фазовому переходу изолятор–металл (переходу Мотта). Принималось, что максимальный радиус орбитали дырки в возбужденном квантовом состоянии электрически нейтрального атома бора не превышает  $d_{im} / 2$  – половины среднего расстояния между ближайшими атомами примесей (как легирующей, так и компенсирующей). Влияние возбужденных состояний электрически нейтральных акцепторов на положение  $A^0$ - и  $A^+$ -зон Хаббарда при увеличении уровня легирования сводится к тому, что потолок  $\nu$ -зоны смещается в глубь запрещенной зоны и щель между ними сужается. Учтено также расщепление основных (невозбужденных) уровней энергии расположенных на расстоянии  $d_{im}$  атомов бора в зарядовых состояниях (0) на триплетное и синглетное состояния двух дырок. Считалось, что энергии прыжковой миграции дырок по атомам бора в  $A^+$ -зоне ( $\varepsilon_4$ ) и в  $A^0$ -зоне ( $\varepsilon_3$ ) примерно равны. Результаты расчетов термической энергии активации  $\varepsilon_2 - \varepsilon_3$  по предложенной формуле без каких-либо подгоночных параметров количественно согласуются с имеющимися экспериментальными данными по энергии активации  $\varepsilon_2 - \varepsilon_3$  для слабо компенсированных кристаллов *p*-Si:B.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках программы Республики Беларусь «Маттех».

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_3 = I_2 \left( 1 - \frac{1}{l_m^2} \right) - \frac{1}{2} \delta E_{(0,0)}(\rho), \quad (9)$$

где  $I_2 = I_b - I_t = 0,945I_b$  – разность уровней энергии атома бора в слабо легированном кристалле;  $\delta E_{(0,0)}(\rho)$  – расщепление уровней энергии двух электрически нейтральных атомов бора;  $\rho = d_{im} / a_H = 2l_m^2$ ;  $d_{im} = 0,554[(1 + K)N]^{-1/3}$  – среднее расстояние между ближайшими примесями в кристалле;  $a_H = e^2 / 8\pi\epsilon_r\epsilon_0 I_b$  – радиус орбитали дырки электрически нейтрального атома бора в кремнии;  $\epsilon_r = 11,47$  – относительная диэлектрическая проницаемость кристаллического кремния;  $I_b = I_H = 44,39$  мэВ – энергия ионизации уединенного атома бора в зарядовом состоянии (0).

На рис. 4 показана зависимость термической энергии активации  $\varepsilon_2 - \varepsilon_3$  переходов дырок между атомами бора (акцепторами) в кристаллическом кремнии от их концентрации  $N$  при степени компенсации донорами  $K = 0,01$ . При увеличении концентрации бора величина  $\varepsilon_2 - \varepsilon_3$  уменьшается, что согласуется с известными экспериментальными данными [13–15] для слабо компенсированных кристаллов кремния *p*-типа. Отметим, что переходу изолятор–металл для *p*-Si:B при  $K = 0,01$  и концентрации атомов бора (акцепторов)  $N = N_M \approx 4 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> соответствует параметр Мотта  $a_H[(1 + K)N_M]^{1/3} \approx 0,23$ .

**Закключение.** Развита квазиклассическая модель уменьшения термической энергии активации прыжковой  $\varepsilon_2$ -электропроводности на постоянном токе между зонами Хаббарда ( $A^0$ - и  $A^+$ -зонами) основной легирующей акцепторной примеси – атомов бора в слабо компенсированном кремнии. Образование  $A^0$ - и  $A^+$ -зон обусловлено возможностью каждому атому бора (как примеси замещения в кристаллическом кремнии) пребывать в одном из трех зарядовых состояний  $(-1, 0, +1)$ . Рассматриваются концентрации бора вплоть до концентраций, соответствующих низкотемпературному фазовому переходу изолятор–металл (переходу Мотта). Принималось, что максимальный радиус орбитали дырки в возбужденном квантовом состоянии электрически нейтрального атома бора не превышает  $d_{im} / 2$  – половины среднего расстояния между ближайшими атомами примесей (как легирующей, так и компенсирующей). Влияние возбужденных состояний электрически нейтральных акцепторов на положение  $A^0$ - и  $A^+$ -зон Хаббарда при увеличении уровня легирования сводится к тому, что потолок  $\nu$ -зоны смещается в глубь запрещенной зоны и щель между ними сужается. Учтено также расщепление основных (невозбужденных) уровней энергии расположенных на расстоянии  $d_{im}$  атомов бора в зарядовых состояниях (0) на триплетное и синглетное состояния двух дырок. Считалось, что энергии прыжковой миграции дырок по атомам бора в  $A^+$ -зоне ( $\varepsilon_4$ ) и в  $A^0$ -зоне ( $\varepsilon_3$ ) примерно равны. Результаты расчетов термической энергии активации  $\varepsilon_2 - \varepsilon_3$  по предложенной формуле без каких-либо подгоночных параметров количественно согласуются с имеющимися экспериментальными данными по энергии активации  $\varepsilon_2 - \varepsilon_3$  для слабо компенсированных кристаллов *p*-Si:B.

**Acknowledgements.** The work is supported by the Belarusian National Research Program “Mattekh”.

## Список использованных источников

1. Поклонский, Н. А. Термическая активация туннельных переходов электронов и дырок в полупроводниках / Н. А. Поклонский // *Международ. зимняя школа по физике полупроводников 2018*. – СПб.: ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, 2018. – С. 32–36.
2. Vanwell, C. T. *Fundamentals of molecular spectroscopy* / C. T. Vanwell, E. M. McCash. – London: McGraw-Hill, 1994. – xii+308 p.
3. Поклонский, Н. А. Электростатические модели концентрационных фазовых переходов изолятор–металл и металл–изолятор в кристаллах Ge и Si с водородоподобными примесями / Н. А. Поклонский, С. А. Вyrko, А. Г. Забродский // *ФТТ*. – 2004. – Т. 46, № 6. – С. 1071–1075.
4. Квазиклассическая модель щели Хаббарда в слабо компенсированных полупроводниках / Н. А. Поклонский [и др.] // *ФТП*. – 2016. – Т. 50, № 3. – С. 302–312.
5. Kajikawa, Y. Analysis of low-temperature data of Hall-effect measurements on Ga-doped *p*-Ge on the basis of an impurity-Hubbard-band model / Y. Kajikawa // *Phys. Status Solidi C*. – 2017. – Vol. 14, N 3–4. – P. 1700071 (9 pp.). <https://doi.org/10.1002/pssc.201700071>
6. Базаров, И. П. Термодинамика / И. П. Базаров. – М.: Высш. шк., 1991. – 376 с.
7. Гинзбург, Л. П. Влияние резонансов на ширину  $D^-$ -зоны / Л. П. Гинзбург // *ФТП*. – 1978. – Т. 12, № 3. – С. 564–567.
8. Роль электростатических флуктуаций при переходе от зонной электропроводности к прыжковой в легированных полупроводниках (на примере *p*-Ge:Ga) / Н. А. Поклонский [и др.] // *ФТП*. – 2016. – Т. 50, № 6. – С. 738–750.
9. Блюменфельд, Л. А. Курс квантовой химии / Л. А. Блюменфельд, А. К. Кукушкин. – М.: МГУ, 1980. – 136 с.
10. Давыдов, А. С. Квантовая механика / А. С. Давыдов. – М.: Наука, 1973. – 704 с.
11. Chen, J. C. Y. Interaction potential between the ground states of H and H<sup>-</sup> / J. C. Y. Chen, J. L. Peacher // *Phys. Rev.* – 1968. – Vol. 167, N 1. – P. 30–38. <https://doi.org/10.1103/physrev.167.30>
12. Влияние перекрытия волновых функций примесных центров на энергию активации прыжковой проводимости / А. П. Мельников [и др.] // *Письма в ЖЭТФ*. – 2000. – Т. 71, № 1. – С. 28–33.
13. Верхняя зона Хаббарда и проводимость по примесям некомпенсированного кремния / Е. М. Гершензон [и др.] // *ФТП*. – 1991. – Т. 25, № 1. – С. 160–163.
14. Chroboczek, J. A. Impurity conduction in silicon and effect of uniaxial compression on *p*-type Si / J. A. Chroboczek, F. H. Pollak, H. F. Staunton // *Phil. Mag. B*. – 1984. – Vol. 50, N 1. – P. 113–156. <https://doi.org/10.1080/13642818408238831>
15. Особенности отрицательного магнитосопротивления при проводимости по верхней зоне Хаббарда в *p*-Si(B) / Ф. М. Исмагилова [и др.] // *ФТП*. – 1991. – Т. 25, № 2. – С. 255–261.

## References

1. Poklonski N. A. Thermal activation of tunneling transitions of electrons and holes in semiconductors. *Mezhdunarodnaya zimnyaya shkola po fizike poluprovodnikov 2018 [Proceedings of the International Winter School on Semiconductor Physics 2018]*. Saint-Petersburg, Ioffe Institute, 2018, pp. 32–36 (in Russian).
2. Banwell C. T., McCash E. M. *Fundamentals of Molecular Spectroscopy*. London, McGraw-Hill, 1994. xii+308 p.
3. Poklonski N. A., Vyrko S. A., Zabrodskii A. G. Electrostatic models of insulator–metal and metal–insulator concentration phase transitions in Ge and Si crystals doped by hydrogen-like impurities. *Physics of the Solid State*, 2004, vol. 46, no. 6, pp. 1101–1106. <https://doi.org/10.1134/1.1767252>
4. Poklonski N. A., Vyrko S. A., Kovalev A. I., Zabrodskii A. G. A quasi-classical model of the Hubbard gap in lightly compensated semiconductors. *Semiconductors*, 2016, vol. 50, no. 3, pp. 299–308. <https://doi.org/10.1134/s1063782616030192>
5. Kajikawa Y. Analysis of low-temperature data of Hall-effect measurements on Ga-doped *p*-Ge on the basis of an impurity-Hubbard-band model. *Physica Status Solidi C*, 2017, vol. 14, no. 3–4, pp. 1700071 (9 pp.). <https://doi.org/10.1002/pssc.201700071>
6. Bazarov I. P. *Thermodynamics*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 376 p. (in Russian).
7. Ginzburg L. P. Influence of resonances on the width of a  $D^-$  band. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov [Physics and technology of semiconductors]*, 1978, vol. 12, no. 3, pp. 326–327 (in Russian).
8. Poklonski N. A., Vyrko S. A., Poklonskaya O. N., Zabrodskii A. G. Role of electrostatic fluctuations in doped semiconductors upon the transition from band to hopping conduction (by the example of *p*-Ge:Ga). *Semiconductors*, 2016, vol. 50, no. 6, pp. 722–734. <https://doi.org/10.1134/s1063782616060191>
9. Blyumenfel'd L. A., Kukushkin A. K. *Course of Quantum Chemistry*. Moscow, Moscow State University Publ., 1980. 136 p. (in Russian).
10. Davydov A. S. *Quantum Mechanics*. Oxford, Pergamon Press, 1976. xiv+636 p.
11. Chen J. C. Y., Peacher J. L. Interaction potential between the ground states of H and H<sup>-</sup>. *Physical Review*, 1968, vol. 167, no. 1, pp. 30–38. <https://doi.org/10.1103/physrev.167.30>
12. Mel'nikov A. P., Gurvich Yu. A., Shestakov L. N., Gershenzon E. M. Effects of the overlap between wave functions of impurity centers on the activation energy of hopping conduction. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 2000, vol. 71, no. 1, pp. 17–20. <https://doi.org/10.1134/1.568267>
13. Gershenzon E. M., Gurvich Yu. A., Mel'nikov A. P., Shestakov L. N. Upper Hubbard band and conduction involving impurities in uncompensated silicon. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov [Physics and technology of semiconductors]*, 1991, vol. 25, no. 1, pp. 95–97 (in Russian).

14. Chroboczek J. A., Pollak F. H., Staunton H. F. Impurity conduction in silicon and effect of uniaxial compression on  $p$ -type Si. *Philosophical Magazine B*, 1984, vol. 50, no. 1, pp. 113–156. <https://doi.org/10.1080/13642818408238831>

15. Ismagilova F. M., Litvak-Gorskaya L. B., Lugovaya G. Ya., Trofimov I. E. Characteristics of a negative magnetoresistance due to conduction in the upper Hubbard band of  $p$ -type Si:B. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov [Physics and technology of semiconductors]*, 1991, vol. 25, no. 2, pp. 154–157 (in Russian).

### Информация об авторах

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

*Вырко Сергей Александрович* – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vyrko@bsu.by.

*Ковалев Александр Игоревич* – аспирант. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kovalev.aleksand@gmail.com.

### Information about the authors

*Poklonski Nikolai Alexandrovich* – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: poklonski@bsu.by.

*Vyrko Sergey Alexandrovich* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior researcher. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vyrko@bsu.by.

*Kovalev Alexander Igorevich* – Postgraduate student. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kovalev.aleksand@gmail.com.

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

УДК 539.216.2  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-415-422>

Поступило в редакцию 23.07.2018  
Received 23.07.2018

И. М. Климович<sup>1</sup>, член-корреспондент Ф. Ф. Комаров<sup>2</sup>, В. А. Зайков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко  
Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ПОДЛОЖЕК И ПОТЕНЦИАЛА СМЕЩЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ Ti–Al–C–N ПОКРЫТИЙ

**Аннотация.** Покрытия Ti–Al–C–N формировались методом реактивного магнетронного осаждения при различных температурах нагрева  $T_s$  (220, 340 и 440 °C) и потенциалах смещения  $U_{см}$  (–90, –150 и –200 В) на подложке. Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии установлено, что повышение  $U_{см}$  приводит к увеличению атомарной концентрации аргона и соотношения (Al + Ti) / (Ti + N) и уменьшению концентрации кислорода в составе покрытий Ti–Al–C–N, а повышение  $T_s$  способствует уменьшению фоновой концентрации кислорода. С помощью растровой электронной микроскопии зафиксирована смена типа структуры покрытий (столбчатая, зернистая и смешанная столбчато-зернистая) при изменении  $T_s$  и  $U_{см}$ . Электрофизические измерения показали изменение удельных сопротивлений пленок в пределах от 1982 до 3169 мкОм · см при изменении технологических условий осаждения. При варьировании  $T_s$  и  $U_{см}$  коэффициенты солнечного поглощения  $\alpha_s$  менялись в пределах от 0,24 до 0,54, излучения – от 0,33 до 0,52, и соотношения  $\alpha_s / \varepsilon$  – от 0,60 до 1,44. Полученные результаты свидетельствуют о возможности варьирования электрофизических и оптических характеристик пленок Ti–Al–C–N путем выбора оптимальных условий их формирования – температуры нагрева подложки и потенциала смещения.

**Ключевые слова:** реактивное магнетронное осаждение, Ti–Al–C–N, растровая электронная микроскопия, удельное сопротивление, коэффициент солнечного поглощения, коэффициент излучения

**Для цитирования.** Климович, И. М. Влияние температуры нагрева подложек и потенциала смещения на оптические характеристики Ti–Al–C–N покрытий / И. М. Климович, Ф. Ф. Комаров, В. А. Зайков // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 415–422. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-415-422>

Iryna M. Klimovich<sup>1</sup>, Corresponding Member Fadei F. Komarov<sup>1</sup>, Valery A. Zaikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>A. N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

## INFLUENCE OF SUBSTRATE HEATING AND BIAS POTENTIAL ON THE Ti–Al–C–N COATINGS OPTICAL CHARACTERISTICS

**Abstract.** Ti–Al–C–N coatings were produced by reactive magnetron deposition at different substrate temperatures  $T_s$  (220, 340 and 440 °C) and bias voltages  $U_{bias}$  (–90, –150 and –200 V). Using the energy dispersive X-ray spectroscopy method, it was found that the increase of the bias voltage led to a growth of argon atomic concentration and the (Al + Ti) / (Ti + N) ratio and to a decrease of the trace oxygen concentration in Ti–Al–C–N coatings. The growth of  $T_s$  promoted a decrease in the oxygen concentration. By means of scanning electron microscopy, a change in the type of the microstructure (columnar, granular and mixed columnar-granular) of coatings by varying  $T_s$  and  $U_{bias}$  was found. Electrophysical measurements showed the change of the film resistivity (1982–3169  $\mu\Omega \cdot cm$ ) when the deposition conditions were varied. The solar absorptance  $\alpha_s$  was varied from 0.24 to 0.54, the emittance  $\varepsilon$  was varied from 0.33 to 0.52, and the  $\alpha_s / \varepsilon$  ratio was varied from 0.60 to 1.44 by changing  $T_s$  and  $U_{bias}$ . The obtained results indicate the opportunity to vary the Ti–Al–C–N films electrophysical and optical characteristics by choosing optimal substrate heating temperature and bias voltage.

**Keywords:** reactive magnetron sputtering, Ti–Al–C–N, scanning electron microscopy, sheet electroresistance, solar absorptance coefficient, emittance

**For citation:** Klimovich I. M., Komarov F. F., Zaikov V. A. Influence of substrate heating and bias potential on the Ti–Al–C–N coatings optical characteristics. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 415–422 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-415-422>

**Введение.** Одним из перспективных направлений использования наноструктурных покрытий является разработка термических преобразователей энергии, работа которых основана на интенсивном поглощении солнечного излучения. Помимо альтернативной энергетики, суще-

ствует другая важная задача – термический контроль спутников и автономных систем для защиты внутренней электроники от перегрева солнечным излучением. Данная задача усложняется тем, что проводимость и конвекция за пределами атмосферы Земли отсутствуют и нагрев определяется только излучательным обменом. Для пико-, нано- и микроспутников хорошим инженерным решением проблемы температурного контроля является нанесение на их поверхность оптически селективных покрытий [1], важным и неоспоримым преимуществом которых, помимо оптических и механических свойств, является их небольшая масса.

При этом следует учитывать, что условия космоса определяют жесткие требования к характеристикам поверхности космического оборудования:

1) поверхность должна быть проводящей во избежание локального скопления заряда, вызванного столкновением с заряженными частицами и способного повредить внутреннюю электронику ( $R_{\square} \leq 250 \text{ k}\Omega/\square$ );

2) поверхность должна выдерживать агрессивную космическую среду (в космосе материалы подвержены бомбардировке ударными частицами льда и пыли), иметь высокую ударную стойкость и химическую стабильность.

Основное требование к функциональным материалам для температурного контроля состоит в способности переизлучать поглощенную тепловую энергию от солнца и от внутренней электроники. Это означает, что материал должен иметь высокий коэффициент термического излучения в ИК диапазоне, что исключает использование для этих целей массивных металлов [2].

Пленки на основе TiN хорошо удовлетворяют всем необходимым условиям для температурного контроля в условиях космоса и являются перспективными кандидатами на роль покрытий для температурного контроля [3]. В свою очередь Ti–Al–N пленки обладают набором характеристик, необходимых как для термических преобразователей солнечной энергии, так и для температурного контроля: температурной стабильностью, механической прочностью и поглощательной способностью, которая в значительной степени зависит от элементного состава [3–5].

Цель исследования – определение зависимости структурных особенностей, электрофизических и оптических характеристик покрытий Ti–Al–C–N, сформированных методом реактивного магнетронного осаждения, от технологических условий их изготовления – температуры нагрева и потенциала смещения на подложке.

**Материалы и методы исследования.** Перед напылением покрытий производилась ионная очистка поверхности подложек с помощью ионного источника «Радикал». Режим работы ионного источника задавался следующими параметрами: давление аргона  $P = 6,0 \cdot 10^{-2}$  Па; ток разряда  $I = 20$  мА; напряжение разряда  $U = 2,4$  кВ; время очистки  $t = 5$  мин. Выбор параметров разряда и времени очистки обусловлен стабильным горением разряда и высокой скоростью очистки.

При осаждении покрытий использовались газы аргон (Ar), азот ( $N_2$ ) и ацетилен ( $C_2H_2$ ). Для контроля расхода азота использовалась зависимость характеристик спектра оптического излучения разряда от содержания азота в вакуумной камере. Количество углерода в составе покрытий контролировалось соотношением парциальных давлений реактивных газов  $N_2 / C_2H_2$ , которое задавалось в пропорции 1 / 1.

В настоящей работе использовался одноканальный алгоритм контроля расхода газов, который сводится к регистрации и поддержанию на заданном уровне интенсивности одного контрольного спектрального элемента. В качестве параметра контроля использовалась линия титана TiI 506,5 нм.

Используемая система контроля расхода газов позволяет поддерживать постоянное соотношение потоков распыленных атомов металла мишени и потока реактивного газа на подложку при постоянном рабочем давлении и постоянных параметрах на источнике питания. Такой способ управления и контроля процессом реактивного магнетронного осаждения дает возможность стационарно поддерживать неравновесное состояние процесса, обеспечивать равномерность распределения элементов по глубине и повышать воспроизводимость процесса формирования покрытий по составу и толщине [6; 7].

Процесс распыления проводили с использованием мозаичной мишени на основе титана марки ВТ1-00 (ГОСТ 19807–91) диаметром 110 мм с восьмью цилиндрическими вставками диаме-

тром 8 мм из алюминиевого сплава АК1.0 (ТУ ВУ 100185302.098–2015), расположенными равномерно по среднему диаметру зоны эрозии (66 мм).

Для осаждения покрытий Ti–Al–C–N были выбраны следующие режимы реактивного магнетронного нанесения: давление  $P = 7,0 \cdot 10^{-2}$  Па; горение магнетронного разряда в режиме постоянного тока; напряжение на источнике питания  $U = 370–470$  В; ток разряда  $I = 1,5$  А. Для определения влияния потенциала смещения  $U_{см}$  и температуры подложки  $T_s$  на структуру и свойства покрытий выбиралось три значения  $U_{см}$  (–90, –150 и –200 В) и три значения  $T_s$  (220, 340 и 440 °С). Время напыления Ti–Al–C–N покрытий равнялось 20 мин. Подслои TiAl и TiAlN осаждали для улучшения адгезии пленок к подложке в течение 1 мин каждый.

Микроструктуру исследуемых покрытий на кремниевых подложках изучали методом расстровой электронной микроскопии (РЭМ) с помощью электронного микроскопа Hitachi S-4800. Микроскоп оснащен энерго-дисперсионным спектрометром, который позволяет определять элементный состав исследуемых покрытий методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС). Толщину покрытий  $h$  измеряли с помощью РЭМ на сколах образцов.

Поверхностное сопротивление  $R_{\square}$  покрытий Ti–Al–C–N на подложках из окисленного кремния измерялось четырехзондовым методом на приборе ИУС-3. Удельное сопротивление  $R_{уд}$  пленок рассчитывалось путем перемножения  $R_{\square}$  и толщины пленки  $h$ .

Спектры отражения и пропускания Ti–Al–C–N покрытий на подложках из натриево-кальциевого стекла в диапазоне 360–1000 нм изучались с помощью системы спектрофотометрического контроля на базе малогабаритного монохроматора S-100. Диаметр измерительного пятна составлял 10 мм. В диапазоне 1000–1300 нм спектры отражения измерялись на спектрофотометре Photon RT под углом падения излучения 8 градусов от нормали. Измерительное пятно имело размеры  $6 \times 1$  мм<sup>2</sup>. Для измерения спектров отражения от покрытий в диапазоне 1,3–25 мкм использовался ИК фурье-спектрометр Vertex 70 с приставкой Pike. Падение света осуществлялось по нормали с фокусировкой измерительного пятна с размером  $10 \times 10$  мм<sup>2</sup>.

Сформированные покрытия Ti–Al–C–N являются непрозрачными из-за достаточно большой толщины покрытий (более 0,9 мкм), поэтому коэффициент пропускания не оказывал влияния на расчет спектров поглощения. Так как пропускание  $T(\lambda) = 0$ , соотношение между отражением  $R(\lambda)$ , излучением  $\varepsilon(\lambda)$  и поглощением  $A(\lambda)$  можно задать с помощью закона Кирхгофа:

$$\varepsilon(\lambda) = A(\lambda) = 1 - R(\lambda).$$

Уменьшение значения  $A(\lambda)$  существенно для углов выше 70°, с уменьшением итогового поглощения менее чем на 4 % [8], поэтому поглощение при нормальном угле падения излучения может рассматриваться в качестве приближения.

Коэффициенты солнечного поглощения  $\alpha_s$  и коэффициенты излучения  $\varepsilon(T)$  для покрытий Ti–Al–N и Ti–Al–C–N рассчитывались согласно теории [9] по формулам

$$\alpha_s = \frac{1}{S} \int_0^{\infty} A(\lambda) P_{\lambda}^i d\lambda, \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) P_{\lambda}^{bb}(T) d\lambda}{\int_0^{\infty} P_{\lambda}^{bb}(T) d\lambda}, \tag{2}$$

где  $P_{\lambda}^i$  – спектральная плотность мощности падающего солнечного излучения;  $P_{\lambda}^{bb}(T)$  – спектральная плотность мощности излучения абсолютно черного тела (формула Планка);  $A(\lambda)$  – спектральный коэффициент поглощения;  $\varepsilon(\lambda)$  – спектральный коэффициент излучения;  $\lambda$  – длина волны падающего излучения;  $S$  – солнечная постоянная (1360 Вт/м<sup>2</sup>).

Для расчетов  $\alpha_s$  по (1) использовали спектр излучения солнца за пределами атмосферы (АМ0), характеризующийся наибольшей плотностью мощности. Для вычисления  $P_{\lambda}^{bb}(T)$  выбрали значение  $T = 23$  °С (или 296,15 К).

**Результаты и их обсуждение.** Элементный состав сформированных покрытий Ti–Al–C–N, определенный методом ЭДРС, представлен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Элементный состав покрытий Ti–Al–C–N, сформированных в различных режимах осаждения  
T a b l e 1. The elemental composition of Ti–Al–C–N coatings produced at different deposition parameters

$U_{\text{см}}, \text{В}$	–90			–150			–200		
$T, \text{°C}$	220	340	440	220	340	440	220	340	440
№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C, ат. %	10,42	7,31	14,67	10,79	12,16	6,29	8,94	6,47	8,16
N, ат. %	18,56	22,62	27,11	21,36	23,49	26,05	18,82	22,48	20,27
O, ат. %	4,02	4,38	2,85	3,85	3,79	1,16	1,49	1,15	1,24
Mg, ат. %	0,10	0,07	0,11	0,05	0,05	0,19	0,12	0,18	0,13
Al, ат. %	17,94	16,55	14,84	14,25	13,82	15,87	15,19	15,85	14,16
Si, ат. %	0,30	3,45	5,31	6,94	4,94	0,33	1,66	0,66	2,48
Ti, ат. %	47,39	44,43	34,33	40,93	39,99	49,19	51,12	51,61	52,09
Cu, ат. %	0,31	0,35	0,28	0,27	0,23	0,21	0,22	0,25	0,24
Ni, ат. %	0,14	0,15	0,09	0,11	0,11	–	–	–	–
Zr, ат. %	0,12	0,15	0,13	0,16	0,15	–	–	–	–
Fe, ат. %	0,23	0,19	0,13	0,16	0,15	–	–	–	–
Ag, ат. %	0,48	0,34	0,16	1,12	1,11	0,76	1,44	1,36	1,23
Al / Ti	0,38	0,37	0,43	0,35	0,35	0,32	0,30	0,31	0,27
(Al + Ti) / (C + N)	2,25	2,04	1,18	1,72	1,51	2,01	2,39	2,33	2,33

Из данных табл. 1 видно, что атомная концентрация Al в пленках не превышает 18 ат. %, а усредненное значение соотношения Al / Ti в пленках составляет 0,34. Соотношение металлических компонент к неметаллическим (Al + Ti) / (C + N) находится в диапазоне от 1,18 до 2,39.

В составе пленок Ti–Al–C–N присутствуют примесные элементы алюминиевого сплава АК10, используемого в качестве алюминиевых вставок в мишени. Также во всех исследуемых образцах пленок зафиксировано присутствие аргона, что может быть связано с имплантацией ионов аргона в растущую пленку, и кислорода, который может негативно влиять на микроструктуру и механические характеристики покрытий [10].

Следует отметить, что увеличение температуры нагрева подложки приводит к уменьшению содержания кислорода в покрытии (табл. 1). Заметного влияния нагрева подложки во время осаждения от 220 до 440 °C на концентрацию остальных компонент пленок Ti–Al–C–N не обнаружено. С увеличением  $U_{\text{см}}$  от –90 до –200 В можно наблюдать следующие тенденции:

количество кислорода уменьшается в 2–4 раза, что может быть связано с особенностями микроструктуры формируемых пленок – чем более рыхлая поверхность у пленки, тем быстрее проходит процесс окисления [11];

атомарное содержание Ag в покрытиях увеличивается, так как с ростом  $U_{\text{см}}$  энергия падающих на осаждаемую поверхность ионов растет и вероятность их имплантации в материал повышается [12];

увеличивается соотношение (Al + Ti) / (Ti + N), что можно объяснить процессом селективного распыления при повышении энергии падающих ионов.

На рис. 1 изображены результаты РЭМ сколов покрытий Ti–Al–C–N, сформированных в различных технологических режимах.

На сколах образцов, сформированных при  $T_s = 220 \text{ °C}$  и  $T_s = 340 \text{ °C}$ , видны следы излома покрытий. Образец 3, сформированный при  $U_{\text{см}} = -90 \text{ В}$  и  $T_s = 440 \text{ °C}$ , имеет столбчатую структуру. В образцах 1, 6 и 7 структура по мере роста толщины слоя переходит от зернистой к столбчатой. Для остальных пленок характерна мелкозернистая структура. Исследуемые пленки являются сплошными, без видимых пустот между элементами структуры.

Рассчитанные из изображений РЭМ результаты измерения скоростей осаждения  $a_D$ , толщин  $h$ , а также результаты определения поверхностного  $R_{\square}$  и расчета удельного сопротивления  $R_{\text{уд}}$  для Ti–Al–C–N покрытий представлены в табл. 2.

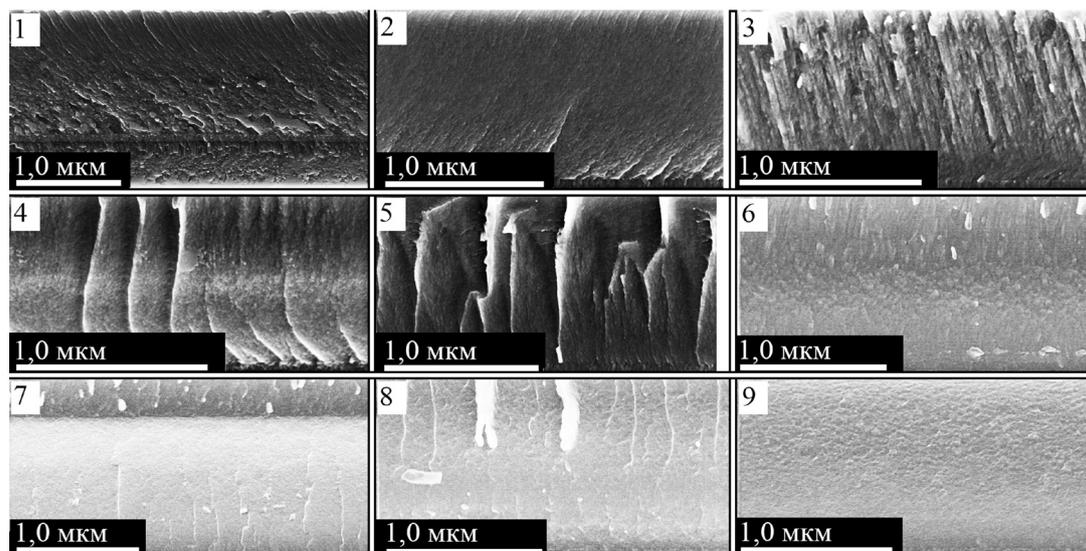


Рис. 1. РЭМ-изображения покрытий Ti–Al–C–N на сколах (цифрами указаны номера образцов из табл. 1)  
 Fig. 1. SEM images of cross-section Ti–Al–C–N coatings (numbers indicate the samples numbers from table 1)

Т а б л и ц а 2. Параметры  $a_D$ ,  $h$ ,  $R_{\square}$  и  $R_{уд}$  для покрытий Ti–Al–C–N, сформированных в режимах с различными  $U_{см}$  и  $T_s$

Table 2. The parameters  $a_D$ ,  $h$ ,  $R_{\square}$ , and  $R_{уд}$  of Ti–Al–C–N coatings deposited at different bias voltages and substrate temperatures

Параметр	Номер образца								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$a_D$ , нм/мин	85,09	56,68	50,59	45,00	56,68	58,18	68,05	54,09	54,55
$h$ , нм	1872	1247	1113	990	1247	1280	1497	1190	1200
$R_{\square}$ , Ом/□	1,07	1,63	1,83	2,00	2,47	2,48	2,01	2,01	2,13
$R_{уд}$ , мкОм · см	2000	2038	2042	1982	3079	3169	3008	2389	2557

Все сформированные покрытия Ti–Al–C–N имеют невысокие значения поверхностных и удельных электросопротивлений и являются хорошо проводящими. Из табл. 2 видно, что нагрев подложек во время осаждения от 220 до 440 °C приводит к росту  $R_{\square}$ . Прямой зависимости между режимами осаждения ( $T_s$  и  $U_{см}$ ) и значениями  $R_{уд}$  не обнаружено, однако с изменением технологических условий осаждения значения  $R_{уд}$  варьировались от 1982 до 3169 мкОм · см.

Известно, что помимо элементного состава важными параметрами, влияющими на значение  $R_{уд}$  являются фазовый состав и кристаллическая структура материала. Например, в [13] было показано, что увеличение доли AlN в составе  $Ti_{1-x}Al_xN$  приводит к линейному росту сопротивления от 84 до 300 мкОм · см при  $0 \leq x \leq 0,4$  и однофазном составе пленки (ГЦК (Ti, Al)N) и к повышению сопротивления до  $8 \cdot 10^7$  мкОм · см при  $0,4 \leq x \leq 0,86$  и двухфазном составе пленки  $Ti_{1-x}Al_xN$  (ГЦК TiN и AlN типа вюрцит).

Учитывая влияние выбора технологического режима осаждения на структуру и фазовый состав покрытий, можно сделать вывод о зависимости значения сопротивлений покрытий от технологических условий их формирования. В [14] нагрев подложки во время процесса осаждения до 400 °C привел к уменьшению значения  $R_{уд}$  покрытий Ti–Al–N, что объяснялось большей подвижностью атомов и, как следствие, к встраиванию атомов в кристаллическую решетку в специальные позиции таким образом, что носители заряда могут легко перемещаться между атомами. И наоборот, в [15] увеличение  $T_s$  приводило к росту удельного сопротивления пленок TiAlN, также как и их последующий отжиг, что авторы связывают с лучшей кристаллическостью пленок, осажденных при более низкой температуре.

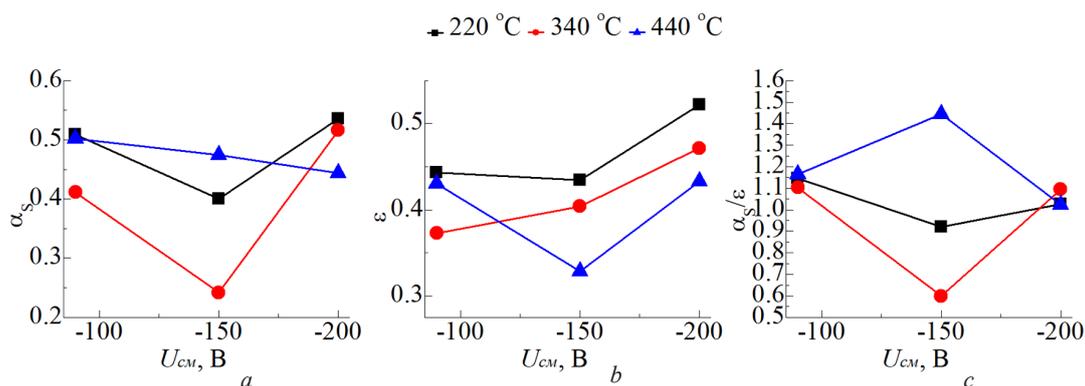


Рис. 2. Оптические характеристики Ti–Al–C–N покрытий в зависимости от  $T_s$  и  $U_{cm}$ : *a* – коэффициенты солнечного поглощения  $\alpha_s$ , рассчитанные по (1); *b* – коэффициенты излучения  $\epsilon$ , рассчитанные по (2); *c* – соотношения  $\alpha_s / \epsilon$   
 Fig. 2. Ti–Al–C–N coatings optical characteristics versus  $T_s$  and  $U_{bias}$ : *a* – the solar absorptance  $\alpha_s$ , calculated by the formula (1); *b* – the emittance  $\epsilon$ , calculated by the formula (2); *c* – the ratio  $\alpha_s / \epsilon$

На рис. 2 представлены результаты расчета коэффициентов солнечного поглощения  $\alpha_s$ , коэффициентов излучения  $\epsilon$  и соотношения  $\alpha_s / \epsilon$ .

Пленки Ti–Al–C–N, сформированные при температурах  $T_s = 220\text{ °C}$  и  $T_s = 340\text{ °C}$ , показали схожие зависимости  $\alpha_s$  и  $\epsilon$  от потенциала смещения: снижение значений  $\alpha_s$  при увеличении  $U_{cm}$  от  $-90$  до  $-150$  В и дальнейший рост  $\alpha_s$  при повышении  $U_{cm}$  до  $-200$  В, а также увеличение коэффициентов излучения  $\epsilon$  покрытий при росте  $U_{cm}$  от  $-90$  до  $-200$  В.

Для покрытий, сформированных при  $T_s = 440\text{ °C}$ , зависимости  $\alpha_s$  и  $\epsilon$  от  $U_{cm}$  имели другой вид: при росте  $U_{cm}$  от  $-90$  до  $-200$  В происходило незначительное снижение коэффициента  $\alpha_s$ , а также снижение коэффициента излучения при увеличении  $U_{cm}$  от  $-90$  до  $-150$  В и дальнейший рост  $\epsilon$  при повышении  $U_{cm}$  до  $-200$  В.

Соотношение  $\alpha_s / \epsilon$  является важным параметром для выбора покрытия в качестве селективного поглощающего либо покрытия для температурного контроля спутников, ведь чем меньше соотношение  $\alpha_s / \epsilon$ , тем более эффективным будет теплоотвод. Поэтому для использования покрытий в качестве температурного контроля необходимо, чтобы коэффициент  $\epsilon$  был больше коэффициента  $\alpha_s$ , т. е. чтобы выполнялось неравенство  $\alpha_s / \epsilon < 1$ . Для фототермических преобразователей желателен низкий коэффициент излучения и высокий коэффициент солнечного поглощения, в связи с чем соотношение  $\alpha_s / \epsilon$  должно иметь более высокие значения.

Из рис. 2, *c* видно, что наименьшее значение  $\alpha_s / \epsilon = 0,60$  соответствует покрытию Ti–Al–C–N, сформированному при  $T_s = 340\text{ °C}$  и  $U_{cm} = -150$  В, а наибольшее соотношение  $\alpha_s / \epsilon = 1,44$  – покрытию Ti–Al–C–N, сформированному при  $T_s = 440\text{ °C}$  и  $U_{cm} = -150$  В.

Оптические характеристики пленок обусловлены совокупностью множества факторов, основные среди которых элементный, химический и фазовый составы пленок, а также рельеф поверхности. В свою очередь состав и морфология покрытий зависят от условий их формирования. В нашем случае изменение температуры нагрева и потенциала смещения на подложке при осаждении пленок Ti–Al–C–N приводило к существенным изменениям коэффициентов солнечного поглощения  $\alpha_s$  (от 0,24 до 0,54) и коэффициентов излучения  $\epsilon$  (от 0,33 до 0,52), что говорит о возможности улучшения оптических характеристик пленок с помощью выбора оптимальных условий их формирования.

**Заключение.** На основании результатов проведенных исследований можно заключить, что температура подложки  $T_s$  и потенциал смещения  $U_{cm}$  оказывают существенное влияние на особенности формирования наноструктурных покрытий Ti–Al–C–N и их характеристики, в частности:

увеличение атомарной концентрации аргона и соотношения  $(Al + Ti) / (Ti + N)$ , а также уменьшение концентрации кислорода при повышении  $U_{cm}$  от  $-90$  до  $-200$  В. При повышении  $T_s$  уменьшалась концентрация кислорода, влияния  $T_s$  на концентрацию других элементов в составе не обнаружено;

исчезновение следов излома на сколах покрытий при повышении  $T_s$  до 440 °С, а также изменение типа структуры при изменении  $T_s$  и  $U_{\text{см}}$ ;

рост  $R_{\square}$  при нагреве подложек во время осаждения от 220 до 440 °С, а также изменение  $R_{\text{уд}}$  в пределах от 1982 до 3169 мкОм · см при изменении технологических условий осаждения.

Изменение коэффициента солнечного поглощения  $\alpha_s$  от 0,24 (обр. № 5) до 0,54 (обр. № 7), излучения  $\varepsilon$  от 0,33 (обр. № 6) до 0,52 (обр. № 7) и соотношения  $\alpha_s / \varepsilon$  от 0,60 (обр. № 5) до 1,44 (обр. № 6) при варьировании  $T_s$  и  $U_{\text{см}}$ .

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности варьирования характеристик пленок Ti–Al–C–N путем выбора оптимальных условий их реактивного магнетронного осаждения – температуры нагрева подложки и потенциала смещения.

### Список использованных источников

1. Baturkin, V. Micro-satellites thermal control-concepts and components / V. Baturkin // *Acta Astronaut.* – 2005. – Vol. 56, N 1–2. – P. 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2004.09.003>
2. Titanium–aluminum–nitride coatings for satellite temperature control / M. Brogren [et al.] // *Thin Solid Films.* – 2000. – Vol. 370, N 1–2. – P. 268–277. [https://doi.org/10.1016/s0040-6090\(00\)00914-7](https://doi.org/10.1016/s0040-6090(00)00914-7)
3. Characterization and temperature controlling property of TiAlN coatings deposited by reactive magnetron co-sputtering / J. T. Chen [et al.] // *J. Alloys Compd.* – 2009. – Vol. 472, N 1–2. – P. 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.04.083>
4. Selvakumar, N. Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid- and high-temperature solar thermal applications / N. Selvakumar, H. C. Barshilia // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* – 2012. – Vol. 98. – P. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.10.028>
5. Ti<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>N coatings for temperature control of spacecraft / M. Brogren [et al.] // EUROPTO Conference on Advances in Optical Interference Coatings. – 1999. – Vol. 3738. – P. 493–501. <https://doi.org/10.1117/12.360120>
6. Система контроля расхода газов для применения в технологии реактивного магнетронного распыления / И. М. Климович [и др.] // *Приборы и методы измерений.* – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 139–147.
7. Бурмаков, А. П. Система управления газовым напуском для магнетронных технологий нанесения пленочных покрытий / А. П. Бурмаков, В. Н. Кулешов, А. В. Столяров // *Международный конгресс по информатике: Информационные системы и технологии.* – Минск: БГУ, 2016. – С. 771–776.
8. Eriksson, T. S. Infrared optical properties of silicon oxynitride films: Experimental data and theoretical interpretation / T. S. Eriksson, C. G. Granqvist // *J. Appl. Phys.* – 1986. – Vol. 60, N 6. – P. 2081–2091. <https://doi.org/10.1063/1.337212>
9. Veszelei, M. Optical properties and equilibrium temperatures of titanium-nitride-and graphite-coated Langmuir probes for space application / M. Veszelei, E. Veszelei // *Thin Solid Films.* – 1993. – Vol. 236, N 1–2. – P. 46–50. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(93\)90640-b](https://doi.org/10.1016/0040-6090(93)90640-b)
10. Influence of oxygen impurities on growth morphology, structure and mechanical properties of Ti–Al–N thin films / H. Riedl [et al.] // *Thin Solid Films.* – 2016. – Vol. 603. – P. 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.01.039>
11. Ustel, F. The Influence of the Ion Bombardment Conditions on the Oxidation Behavior of Sputtered TiN Coatings / F. Ustel, P. H. Mayrhofer, C. Mitterer // *Prakt. Met.* – 2002. – Vol. 39, N 39. – P. 587–598.
12. Microstructural evolution during film growth / I. Petrov [et al.] // *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.* – 2003. – Vol. 21, N 5. – P. S117–S128. <https://doi.org/10.1116/1.1601610>
13. Crystal growth and microstructure of polycrystalline Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N alloy films deposited by ultra-high-vacuum dual-target magnetron sputtering / U. Wahlström [et al.] // *Thin Solid Films.* – 1993. – Vol. 235, N 1–2. – P. 62–70. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(93\)90244-j](https://doi.org/10.1016/0040-6090(93)90244-j)
14. Effect of Al content, substrate temperature and nitrogen flow on the reactive magnetron co-sputtered nanostructure in TiAlN thin films intended for use as barrier material in DRAMs / R. Jalali [et al.] // *J. Korean Phys. Soc.* – 2015. – Vol. 66, N 6. – P. 978–983. <https://doi.org/10.3938/jkps.66.978>
15. Effects of deposition and post-annealing conditions on electrical properties and thermal stability of TiAlN films by ion beam sputter deposition / S.-Y. Lee [et al.] // *Thin Solid Films.* – 2006. – Vol. 515, N 3. – P. 1069–1073. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.07.172>

### References

1. Baturkin V. Micro-satellites thermal control-concepts and components. *Acta Astronautica*, 2005, vol. 56, no. 1–2, pp. 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2004.09.003>
2. Brogren M., Harding G. L., Karmhag R., Ribbing C. G., Niklasson G. A., Stenmark L., Titanium–aluminum–nitride coatings for satellite temperature control. *Thin Solid Films*, 2000, vol. 370, no. 1–2, pp. 268–277. [https://doi.org/10.1016/s0040-6090\(00\)00914-7](https://doi.org/10.1016/s0040-6090(00)00914-7)
3. Chen J. T., Wang J., Zhang F., Zhang G. A., Fan X. Y., Wu Z. G., Yan P. X. Characterization and temperature controlling property of TiAlN coatings deposited by reactive magnetron co-sputtering. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 472, no. 1–2, pp. 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.04.083>
4. Selvakumar N., Barshilia H. C. Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid- and high-temperature solar thermal applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, vol. 98, pp. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.10.028>

5. Brogren M., Harding G. L., Karmhag R., Niklasson G. A., Ribbing C.-G., Stenmark L.  $Ti_xAl_yN$  coatings for temperature control of spacecraft. *EUROPTO Conference on Advances in Optical Interference Coatings*, 1999, vol. 3738, pp. 493–501. <https://doi.org/10.1117/12.360120>

6. Klimovich I. M., Kuleshov V. N., Zaikov V. A., Burmakov A. P., Komarov F. F., Ludchik O. R. Gas flow control system in reactive magnetron sputtering technology. *Pribory i metody izmerenii = Devices and methods of measurements*, 2015, vol. 6, no. 2, pp. 139–147 (in Russian).

7. Burmakov A. P., Kuleshov V. N., Stolyarov A. V. Gas flow control system for magnetron film deposition technologies. *Mezhdunarodnyi kongress po informatike: Informatsionnye sistemy i tekhnologii [International Congress on Computer Science: Information Systems and Technologies]*. Minsk, Belarusian State University, 2016, pp. 771–776 (in Russian).

8. Eriksson T. S., Granqvist C. G. Infrared optical properties of silicon oxynitride films: Experimental data and theoretical interpretation. *Journal of Applied Physics*, 1986, vol. 60, no. 6, P. 2081–2091. <https://doi.org/10.1063/1.337212>

9. Veszelei M., Veszelei E. Optical properties and equilibrium temperatures of titanium-nitride-and graphite-coated Langmuir probes for space application. *Thin Solid Films*, 1993, vol. 236, no. 1–2, pp. 46–50. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(93\)90640-b](https://doi.org/10.1016/0040-6090(93)90640-b)

10. Riedl H., Koller C. M., Munnik F., Hutter H., Mendez M. F., Rachbauer R., Kolozsvári S., Bartosik M., Mayrhofer P. H. Influence of oxygen impurities on growth morphology, structure and mechanical properties of Ti–Al–N thin films. *Thin Solid Films*, 2016, vol. 603, pp. 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.01.039>

11. Ustel F., Mayrhofer P. H., Mitterer C. The Influence of the Ion Bombardment Conditions on the Oxidation Behavior of Sputtered TiN Coatings. *Praktische Metallographie = Practical Metallography*, 2002, vol. 39, no. 11, pp. 587–598.

12. Petrov I., Barna P. B., Hultman L., Greene J. E. Microstructural evolution during film growth. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2003, vol. 21, no. 5, pp. S117–S128. <https://doi.org/10.1116/1.1601610>

13. Wahlström U., Hultman L., Sundgren J.-E., Adibi F., Petrov I., Greene J. E. Crystal growth and microstructure of polycrystalline  $Ti_{1-x}Al_xN$  alloy films deposited by ultra-high-vacuum dual-target magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 1993, vol. 235, no. 1–2, pp. 62–70. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(93\)90244-j](https://doi.org/10.1016/0040-6090(93)90244-j)

14. Jalali R., Parhizkar M., Bidadi H., Naghshara H., Hosseini S. R., Jafari M. Effect of Al content, substrate temperature and nitrogen flow on the reactive magnetron co-sputtered nanostructure in TiAlN thin films intended for use as barrier material in DRAMs. *Journal of the Korean Physical Society*, 2015, vol. 66, no. 6, pp. 978–983. <https://doi.org/10.3938/jkps.66.978>

15. Lee S.-Y., Wang S.-C., Chen J.-S., Huang J.-L. Effects of deposition and post-annealing conditions on electrical properties and thermal stability of TiAlN films by ion beam sputter deposition. *Thin Solid Films*, 2006, vol. 515, no. 3, pp. 1069–1073. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.07.172>

### Информация об авторах

*Климович Ирина Михайловна* – аспирант. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: imklimovich@gmail.com.

*Комаров Фадей Фадеевич* – член-корреспондент, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: komarovf@bsu.by.

*Зайков Валерий Александрович* – ст. преподаватель. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: valery48@tut.by.

### Information about the authors

*Klimovich Iryna Mikhailovna* – Postgraduate student. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: imklimovich@gmail.com.

*Komarov Fadei Fadeevich* – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Laboratory. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: komarovf@bsu.by.

*Zaikov Valery Aleksandrovich* – Senior Lecturer. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: valery48@tut.by.

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

**ХИМИЯ**  
**CHEMISTRY**

УДК 577.151.4  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-423-431>

Поступило в редакцию 25.04.2018  
Received 25.04.2018

**Я. В. Диченко<sup>1</sup>, Е. С. Гудный<sup>2</sup>, член-корреспондент С. А. Усанов<sup>1</sup>**

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

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

**СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЦИТОХРОМА P450 7B1 ЧЕЛОВЕКА  
С АМИНОКИСЛОТНОЙ ЗАМЕНОЙ Phe470Ile**

**Аннотация.** С целью изучения влияния аминокислотной замены Phe470Ile, коррелирующей с возникновением спастической параплегии типа 5, на пространственную структуру цитохрома P450 7B1 человека построены компьютерные модели данного фермента и его варианта с соответствующей мутацией. Установлено, что Phe470 не влияет напрямую на каталитические свойства фермента в силу того, что он локализован далеко от активного центра фермента. Однако расположение 470 остатка в высоко консервативной области белка свидетельствует о его важной роли в формировании корректной пространственной структуры исследуемой стероид 7 $\alpha$ -гидроксилазы. В частности, аминокислотная замена Phe470Ile приводит к увеличению жесткости и, как следствие этого, стабильности пространственной структуры CYP7B1, что может являться причиной изменения профиля гидроксилазной активности фермента по отношению к нейростероидам.

**Ключевые слова:** цитохром P450 7B1 человека (CYP7B1), спастическая параплегия типа 5, ускоренная молекулярная динамика, стабильность белковой глобулы, метод главных компонент

**Для цитирования.** Диченко, Я. В. Структурные особенности цитохрома P450 7B1 человека с аминокислотной заменой Phe470Ile / Я. В. Диченко, Е. С. Гудный, С. А. Усанов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 423–431. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-423-431>

**Yaraslau V. Dzichenka<sup>1</sup>, Eugene S. Gudny<sup>2</sup>, Corresponding Member Sergei A. Usanov<sup>1</sup>**

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

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

**STRUCTURAL FEATURES OF HUMAN CYTOCHROME P450 7B1  
WITH AN AMINO ACID SUBSTITUTION OF Phe470Ile**

**Abstract.** To study the influence of the amino acid substitution of Phe470Ile, correlating with the spastic paraplegia of type 5, on the structure of human cytochrome P450 7B1, the spatial full-atomic models of this enzyme and its mutant form were created. It was found that Phe470 does not influence directly the catalytic properties of the enzyme because of its localization far from the active site. It was shown that the residue under investigation belongs to a highly conservative region of the protein structure and can influence the CYP7B1 correct folding. In particular, the amino acid substitution of Phe470Ile increases rigidity and stability of sterol 7 $\alpha$ -hydroxylase. This can be a reason of changes in the CYP7B1 hydroxylase activity in relation to neurosteroids.

**Keywords:** human cytochrome P450 7B1 (CYP7B1), spastic paraplegia type 5, accelerated molecular dynamics, stability of protein structure, principal component analysis

**For citation:** Dzichenka Y. V., Gudny E. S., Usanov S. A. Structural features of human cytochrome P450 7B1 with an amino acid substitution Phe470Ile. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 423–431 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-423-431>

**Введение.** Цитохром P450 7B1 (CYP7B1, EC 1.14.13.100) – гем-содержащий микросомальный фермент, локализованный в эндоплазматическом ретикулуме клеток [1] и катализирующий  $\alpha$ - и 7 $\alpha$ -гидроксилирование стероидов. CYP7B1 экспрессируется клетками многих тканей и орга-

нов, при этом больше всего CYP7B1 синтезируется в печени и мозге, в то же время уровень фермента в клетках почек, сердца, селезенки, семенников, предстательной железы, толстого и тонкого кишечника значительно ниже [2]. Локализация данного гемопротеида в организме связана с многообразием функций, осуществляемых им в различных тканях – альтернативный путь биосинтеза желчных кислот, метаболизм нейростероидов, половых гормонов, регуляция активности макрофагов [3–6].

Мутации в гене, кодирующем CYP7B1, приводят к возникновению патологий печени и нервной системы [1]. Всего к настоящему времени известно 12 точечных аминокислотных замен CYP7B1, из которых 4 несмысловые (R63X, R112X, Y275X, R388X) и 8 смысловые (G57R, F216S, T297A, S363F, R417H, R417C, F470I, R486C) [7]. В результате некоторых из этих мутаций повышается уровень гепатотоксичных желчных кислот, не содержащих гидроксильной группы в 7 положении, что приводит к повреждению печени и летальному исходу [8]. Другие замены приводят к нейродегенеративным процессам в центральной нервной системе, результатом которых является спастическая параплегия 5-го типа (SPG5) [7] – наследственное ауточномное рецессивное заболевание, характеризующееся прогрессирующим спастическим парапарезом нижних конечностей и общей слабостью, вызванной дегенерацией нейронов пирамидного пути [9]. Кроме того, в ряде работ показана взаимосвязь между уровнем экспрессии CYP7B1 и развитием болезни Альцгеймера [10], рака простаты [11] и ревматоидного артрита [12].

Причины возникновения данных заболеваний на молекулярном уровне до сих пор не установлены. Во многом это связано с недостатком информации о механизме функционирования CYP7B1 в норме и при патологии, в частности, до сих пор не разрешена пространственная структура данного белка. Однако ранее уже были попытки изучить лиганд-связывающие свойства стероид 7 $\alpha$ -гидроксилазы с использованием современных методов компьютерного моделирования [13; 14], что является разумной инициативой в условиях недостатка или невозможности получения экспериментальных данных. Недостатком упомянутых работ является то, что в них рассматривалось только влияние точечных аминокислотных замен на каталитические свойства стероид 7-гидроксилазы. В то же время связь структурных особенностей с определенными мутациями CYP7B1 выявлена не была.

Цель данной работы заключается в анализе структурных особенностей цитохрома P450 7B1 и его варианта с аминокислотной заменой Phe470Ile (CYP7B1\_F470I) с использованием методов компьютерного моделирования.

**Материалы и методы исследования.** Компьютерную модель CYP7B1 строили с использованием сервера I-TASSER [15]. Пространственную структуру мутантной формы фермента конструировали заменой соответствующего аминокислотного остатка и последующим уравниванием системы по протоколу, описанному ниже.

Предсказание влияния точечной мутации на стабильность пространственной структуры CYP7B1 осуществляли с использованием сервера SDM [16], а также молекулярной динамики. Для моделирования 200 нс эволюции системы использовали метод ускоренной молекулярной динамики (accelerated Molecular Dynamics – aMD), суть которого заключается в изменении потенциала взаимодействия для ускорения перехода системы в новое состояние и покрытия большего конформационного пространства молекулы. Протокол эксперимента включал в себя следующие стадии: подготовка системы, минимизация, нагрев, уравнивание, свободная динамика, ускоренная динамика.

Для уравнивания системы, а также для расчета параметров aMD, полученные *in silico* структуры вначале минимизировали в течение 4000 шагов (2000 шагов с наложением пространственных ограничений на движение атомов белка (10 ккал/(моль · Å<sup>2</sup>)) и 2000 шагов без ограничений) и нагревали до температуры 298 К в течение 500 пс (NVT ансамбль). После этого моделировали свободную динамику на временном промежутке 5,5 нс (NPT ансамбль), причем 500 пс не учитывали при расчете параметров aMD, так как в это время происходило уравнивание системы.

Эксперимент проводили с использованием программного пакета Amber 16 (силовое поле ff14SB). Имитацию растворителя и физиологических условий осуществляли путем помещения молекулы белка в октаэдр, заполненный молекулами воды (трехточечная модель TIP3P), и добав-

ления в систему ионов натрия и хлора. Объем растворителя моделировали с использованием периодических граничных условий. Эксперимент проводили в изотермических условиях при  $T = 298$  К (для этого применяли коллизионный термостат с частотой столкновений  $1 \text{ ps}^{-1}$ ). Постоянное давление  $p = 1$  атм поддерживалось при помощи внешнего баростата. На всех этапах граничный радиус учета невалентных взаимодействий составлял  $10 \text{ \AA}$ .

Анализ траекторий молекулярной динамики осуществляли с использованием собственных сценариев, написанных на языке Python3: для непосредственной обработки данных молекулярного моделирования применяли библиотеку `ruTraj v.2.0.2.`; для визуализации результатов использовали библиотеку `matplotlib v.2.2.2.` Визуализацию пространственных структур белков и лигандов осуществляли в программе `Chimera v.1.11.2` [16].

**Результаты и их обсуждение.** Phe470 является консервативным аминокислотным остатком, представленным у всех стероид  $7\alpha$ -гидроксилаз [17]. Анализ пространственной структуры CYP7B1 (рис. 1, *a*) свидетельствует о том, что данный остаток локализован в  $\beta$ -слое 3–3 достаточно далеко от активного центра фермента: расстояние между  $C_\alpha$  атомом Phe470 и атомом  $\text{Fe}^{3+}$  гема составляет  $29 \text{ \AA}$ . Phe470 образует внутримолекулярные контакты с Leu169, Leu466, Tyr469, Asp471, Leu472, Lys503, Val504, Lys505 и Tyr502 (рис. 1, *b*, остатки выделены синим цветом), причем в последнем случае реализуется стэкинг-взаимодействие, которое сохраняется в процессе 200 нс молекулярной динамики: среднее значение величины двугранного угла между плоскостями ароматических фрагментов составляет  $5,7^\circ$ , а расстояния –  $5,5 \text{ \AA}$ . Все указанные аминокислотные остатки, за исключением Val504, являются консервативными (табл. 1), причем Tyr502, Lys503 и Lys505 сохраняются у всех стероид  $7\alpha$ -гидроксилаз, а Leu466, Asp471, Leu472 только

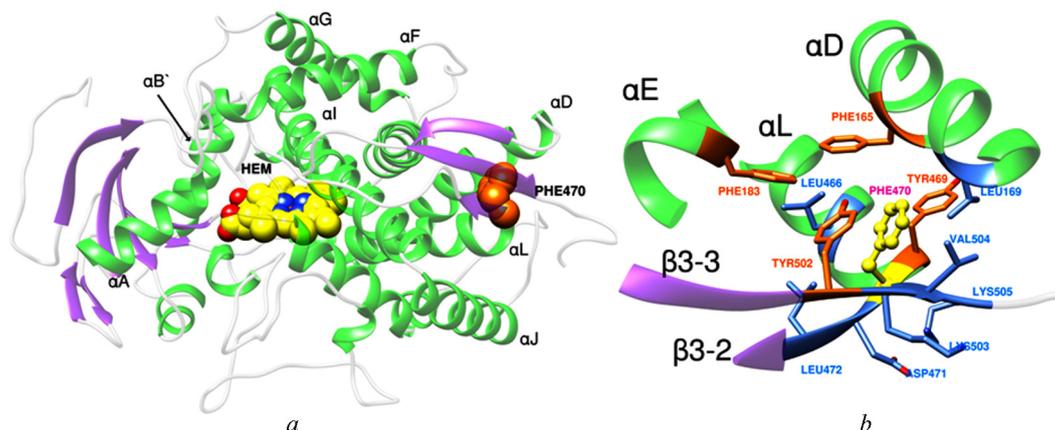


Рис. 1. Пространственная структура CYP7B1 (*a*) и фрагмент пространственной структуры (*b*), содержащий Phe470, с обозначением аминокислотных остатков, образующих с ним контакты

Fig. 1. Spatial structure of CYP7B1 (*a*) and fragment of the structure of the enzyme (*b*), which contains Phe470. Residues that form contacts with Phe470 are marked

Т а б л и ц а 1. Аминокислотные остатки, образующие контакты с Phe470

T a b l e 1. Amino acid residues forming contacts with Phe470

Аминокислотный остаток Amino acid residue	Локализация Localization	Сохраняется у Conserved for	Расстояние, $\text{\AA}$ Distance, $\text{\AA}$	
			CYP7B1	CYP7B1_F470I
Leu169	$\alpha$ -спираль D	CYP7B1, CYP39A1	$8,3 \pm 0,6$	$8,0 \pm 0,7$
Leu466	$\alpha$ -спираль L	CYP7B1	$5,8 \pm 0,2$	$5,5 \pm 0,3$
Tyr469	$\alpha$ -спираль L	CYP7	$3,9 \pm 0,1$	$3,9 \pm 0,1$
Asp471	$\beta$ -слой 3–2	CYP7B1	$3,8 \pm 0,1$	$3,8 \pm 0,1$
Leu472	$\beta$ -слой 3–2	CYP7B1	$6,2 \pm 0,2$	$6,4 \pm 0,2$
Tyr502	$\beta$ -слой 3–3	Стероид $7\alpha$ -гидроксилаз	$6,4 \pm 0,3$	$6,7 \pm 0,2$
Lys503	$\beta$ -слой 3–3	Стероид $7\alpha$ -гидроксилаз	$5,5 \pm 0,2$	$5,6 \pm 0,2$
Val504	$\beta$ -слой 3–3	–	$4,5 \pm 0,3$	$4,5 \pm 0,2$
Lys505	$\beta$ -слой 3–3	Стероид $7\alpha$ -гидроксилаз	$5,0 \pm 0,4$	$5,4 \pm 0,4$

у СУР7В1. Кроме того, следует отметить, что Tyr469 и Tyr502 вместе с Phe165 ( $\alpha$ -спираль, сохраняется у СУР7В1) и Phe183 ( $\alpha$ -спираль E, сохраняется у СУР7) образуют кластер ароматических аминокислотных остатков (выделены оранжевым цветом на рисунке) вокруг С-конца  $\alpha$ -спирали L (рис. 1, b). Таким образом, совокупность полученных данных свидетельствует о том, что аминокислотная замена в 470 положении может иметь значительное влияние на пространственную структуру СУР7В1.

Для оценки локальных изменений физико-химических свойств белка в результате замены Phe на Pe проводили анализ факторов Кайдера (Kidera factors) [18] – минимальный набор параметров, описывающих физико-химические и конформационные свойства аминокислотных остатков (табл. 2). Расчет осуществляли для  $k$ -мер (подпоследовательностей длины  $k$ , в данной работе  $k = 9$ ) аминокислотных последовательностей обоих белков.

Т а б л и ц а 2. Факторы Кайдера и соответствующие им евклидовы метрики, рассчитанные для СУР7В1 и СУР7В1\_F470I

Table 2. Kaidera's factors and their appropriate Euclidean metrics calculated for СУР7В1 and СУР7В1\_F470I

Фактор Factor	Евклидова метрика Euclidean metric
1. Тенденция к формированию $\alpha$ -спирали/ $\beta$ -цепи	0,17
2. Размер боковой цепи	0,38
3. Тенденция к формированию $\beta$ -слоя	0,72
4. Гидрофобность	0,22
5. Тенденция к формированию двойного изгиба	0,25
6. Парциальный объем	0,28
7. Тенденция к формированию плоской структуры	0,50
8. Частота встречаемости в $\alpha$ -спирали	0,20
9. рК диссоциации карбоксильной группы	0,35
10. Гидрофобность аминокислоты в белковом окружении	0,45

Согласно полученным данным, замена Phe470Pe является причиной локального изменения ряда физико-химических и конформационных свойств белка (табл. 2). Так, в результате мутации молекулярный объем 470 аминокислотного остатка уменьшается на 14 % (фактор 2), что приводит к появлению полости внутри белковой глобулы и для Pe470 становится возможным движение «внутри» белка. Также очевидно, что у мутантной формы СУР7В1 пропадает стэкинг-взаимодействие с Tyr502. Помимо этого, установлено, что в случае изолейцина, по сравнению с фенилаланином, выше тенденция к формированию  $\beta$ -слоя (фактор 3) – элемента вторичной структуры, увеличивающего стабильность белка в целом. В результате анализа также показано, что для Pe470 снижается рК диссоциации карбоксильной группы (фактор 9) и уменьшается параметр его гидрофобности при локализации внутри белка (фактор 10).

Предсказание влияния исследуемой мутации на структуру СУР7В1 осуществляли также с использованием сервера SDM. Полученные результаты свидетельствуют о том, что замена Phe470 на Pe приводит к увеличению стабильности белка (псевдо  $\Delta\Delta G = 0,36$ , относительно нулевого уровня для исходного белка). Кроме того, также увеличивается процент поверхности аминокислотного остатка, доступной растворителю: 0,9 % для СУР7В1 и 1,3 % для СУР7В1\_F470I.

Анализ особенностей пространственной укладки СУР7В1 и СУР7В1\_F470I, проведенный с использованием метода ускоренной молекулярной динамики, показал, что в целом структуры обоих ферментов остаются стабильными в течение всего времени эксперимента. На это указывают кривые изменения полной энергии молекулы (рис. 2, a) и среднеквадратичного отклонения (СКО) относительно начального положения (рис. 2, b), при этом на графике зависимости СКО от времени соответствующая кривая для мутантной формы лежит ниже кривой для дикого типа, что свидетельствует о большей жесткости структуры в первом случае. Интересно, что значимых различий в величине полной энергии (рис. 2, a) в процессе динамики при этом не наблюдается.

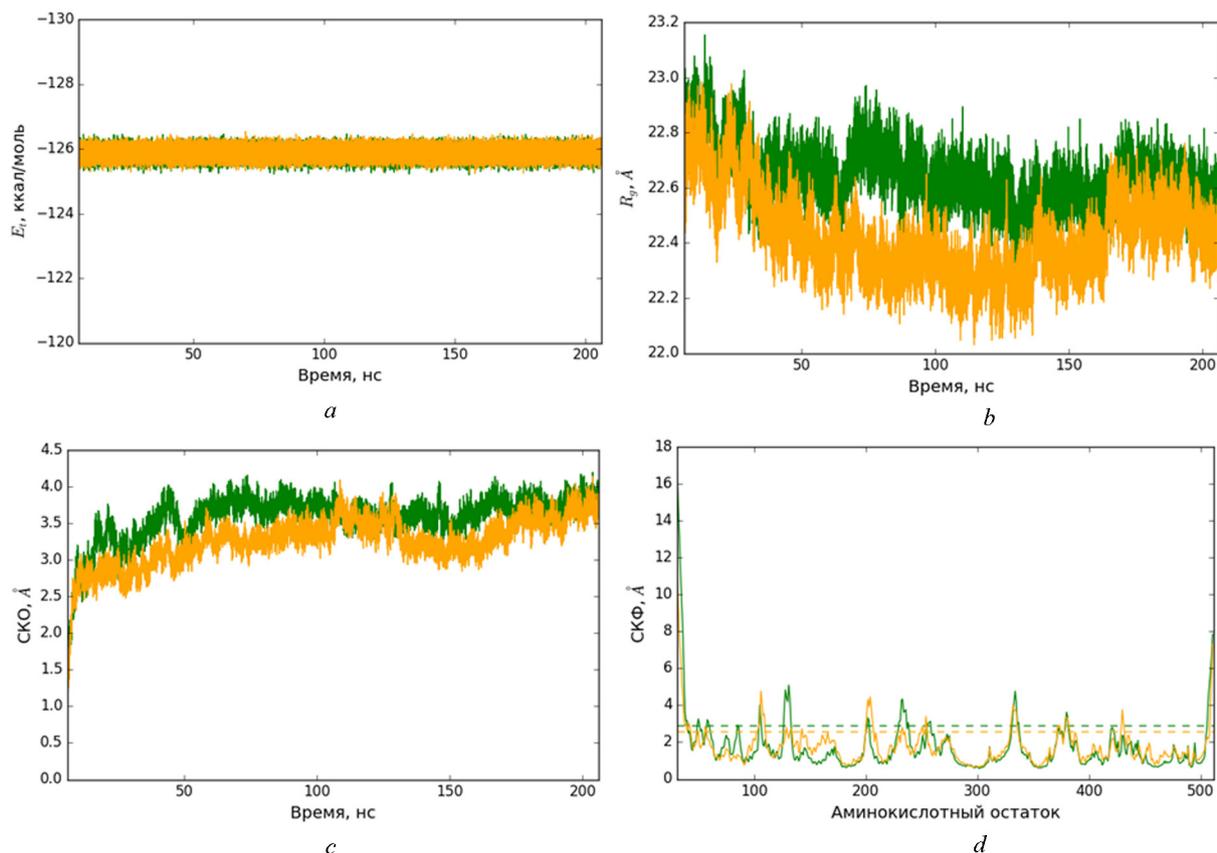


Рис. 2. Результаты расчета полной энергии молекул (а), среднеквадратичного отклонения, относительно начального положения аМД (b), радиуса гирации (с) и среднеквадратичной флуктуации атомов (d) для СУР7В1 (зеленый) и СУР7В1\_F470I (оранжевый)

Fig. 2. Results of calculation of total molecule energy (a), root-mean-square deviation towards first frame of aMD (b), radius of gyration (c) and root-mean-square fluctuation of atoms (d) for CYP7B1 (green) and CYP7B1\_F470I (orange)

В пользу стабильности построенных моделей свидетельствуют также результаты расчета радиусов гирации (рис. 2, c) для СУР7В1\_WT и СУР7В1\_F470I: соответствующие величины снижаются в обоих случаях с течением времени. Однако, согласно полученным результатам, введение мутации в структуру СУР7В1 приводит к увеличению компактности молекулы: для СУР7В1\_F470I радиус гирации на большей части траектории меньше, чем для исходного белка.

Наибольшей подвижностью, согласно рассчитанным величинам среднеквадратичной флуктуации (СКФ)  $C_{\alpha}$  атомов основной цепи (рис. 2, d), обладают аминокислотные остатки, формирующие N- и C-концевые фрагменты белков (31–41, 507–512 для СУР7В1\_WT и 31–42, 508–512 для СУР7В1\_F470I, нумерация здесь и далее согласно положениям соответствующих аминокислотных остатков в полноразмерном белке). Так как данные мажорные движения могут давать существенный вклад в результаты анализа МД траектории, все расчеты проводились без их учета. Относительно большие значения величин СКФ (больше стандартного отклонения от медианного значения) также наблюдаются для атомов аминокислотных остатков 127–134, 230–239, 331–338 (СУР7В1\_WT) и 104–111, 200–208, 330–337, 375–379 (СУР7В1\_F470I) соответственно. Согласно структурным данным, указанные остатки принадлежат петлям, экспонированным на поверхности соответствующих белков, что и обуславливает их высокую подвижность.

Как было указано выше, Phe470 взаимодействует с рядом аминокислотных остатков в структуре СУР7В1. Сравнение расстояний между атомами  $C_{\alpha}^{470}-C_{\alpha}^i$  ( $i$  – номер аминокислотного остатка, с которым Phe470 образует контакты) для исходного белка и мутантной формы свидетельствует о том, что замена Phe470Ile не приводит к значительному изменению расстояния между рассматриваемыми остатками (табл. 1), что свидетельствует в пользу стабильности струк-

тур CYP7B1\_F470I и CYP7B1\_WT. Однако тот факт, что расстояние между  $C_{\alpha}^{470}$  и  $C_{\alpha}^{169}$ ,  $C_{\alpha}^{466}$  и атомом железа гема меньше для CYP7B1\_F470I, указывает на увеличение компактности белковой глобулы. Интересно отметить, что для мутантной формы величина расстояния  $C_{\alpha}^{470}$ –Fe ( $28,1 \pm 0,8 \text{ \AA}$ ) ближе к начальному значению, приведенному выше, чем для исходного фермента ( $31,7 \pm 0,7 \text{ \AA}$ ), что свидетельствует в пользу большей жесткости структуры CYP7B1\_F470I.

Для получения представления о способности белков существовать в различных конформациях, результаты молекулярной динамики дополнительно анализировали с использованием метода главных компонент. Исходя из графиков полной дисперсии собственных значений установлено, что основная часть всех движений (не менее 90 %) в моделях как CYP7B1, так и CYP7B1\_F470I в процессе динамики описываются при помощи 2 первых главных компонент (рис. 3, *a*). Проекция снимков траектории на плоскость, сформированную этими компонентами (рис. 3, *a* на вставке) представляет собой набор точек, имеющий U-образную форму. Это означает, что как для CYP7B1, так и для CYP7B1\_F470I в процессе молекулярной динамики отсутствуют значительные структурные изменения, способные привести к заклиниванию модели в глубокой потенциальной яме. Это также подтверждают результаты, полученные при анализе поверхности потенциальной энергии (ППЭ) (рис. 3, *b*) для обеих структур и парного среднееквдратичного отклонения (рис. 3, *c*) в процессе молекулярной динамики. Так, формы потенциальной ямы на ППЭ практически совпадают как для CYP7B1, так и для CYP7B1\_F470I: присутствует только один глубокий минимум, однако путь к нему, а также конечное состояние немного отличаются в силу изменения подвижности частей белка друг относительно друга в результате мутации. Согласно результатам расчетов парного среднееквдратичного отклонения, также можно заключить о стабильности моделей CYP7B1 и CYP7B1\_F470I, но в то же время можно говорить о том, что структура мутантного белка менее подвержена внутримолекулярным движениям на начальных этапах динамики.

Анализ вклада отдельных аминокислотных остатков позволяет заключить, что в случае CYP7B1 наибольший вклад в первые две главные компоненты вносят движения аминокислотных остатков (рис. 4), принадлежащие, в основном, неструктурированным участкам последовательности. Соотнесение полученных результатов с пространственной структурой фермента

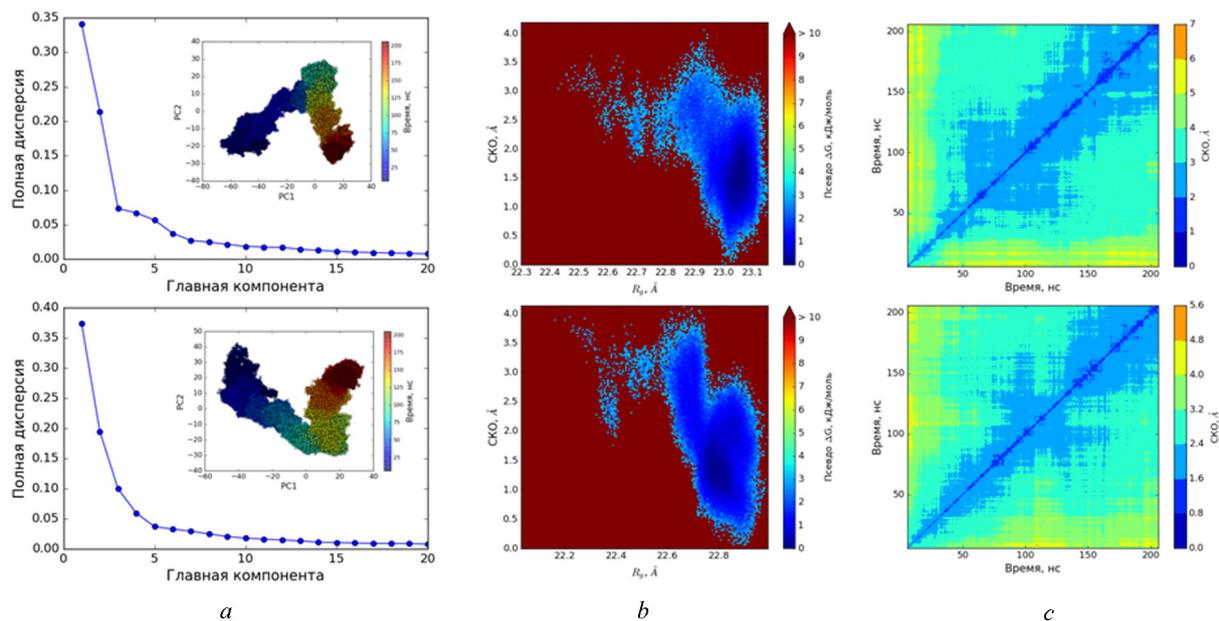


Рис. 3. Результаты анализа траекторий молекулярной динамики для CYP7B1 (верхний ряд) и CYP7B1\_F470I (нижний ряд) с использованием метода главных компонент (*a*), поверхности потенциальной энергии молекул (*b*) и парного среднееквдратичного отклонения относительно начального этапа aMD (*c*)

Fig. 3. Results of the analysis of molecular dynamics simulation for CYP7B1 (upper) and CYP7B1\_F470I (lower) by using of principal component analysis approach (*a*), free energy surface approach (*b*) and pairwise root-mean-square deviation towards first frame of aMD (*c*)

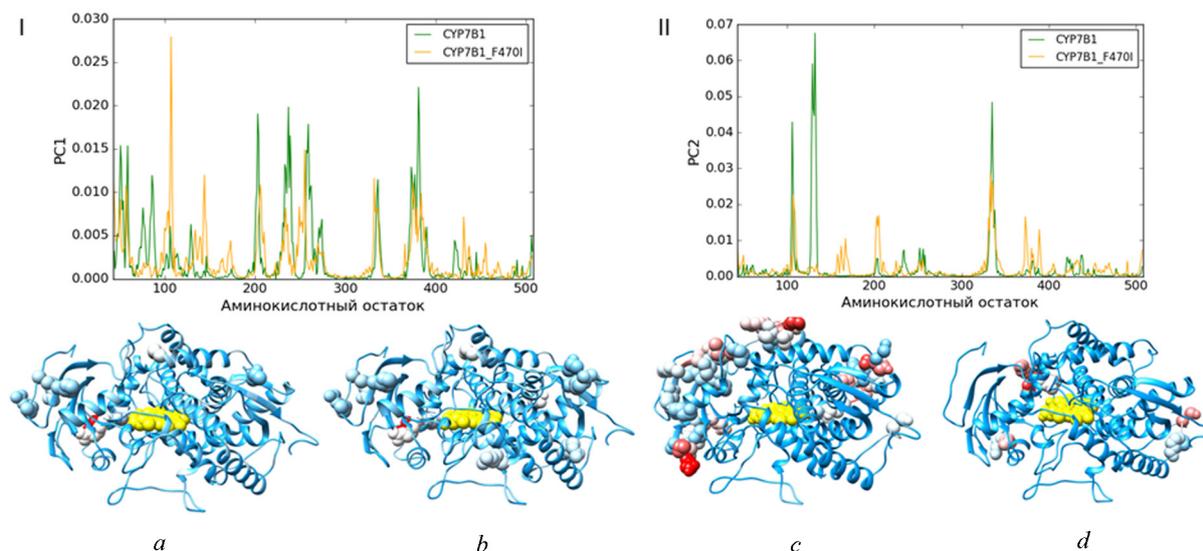


Рис. 4. Вклад отдельных аминокислотных остатков CYP7B1 (*a, c*) и CYP7B1\_F470I (*b, d*) в первую (I) и вторую (II) главные компоненты. Структуры белков раскрашены исходя из вклада отдельных аминокислотных остатков в соответствующую главную компоненту (минимум – синий цвет, максимум – красный). Желтым цветом выделен гем  
 Fig. 4. Contribution of individual amino acid residues of CYP7B1 (*a, c*) and CYP7B1\_F470I (*b, d*) in first (I) and second (II) principal components. Structures of the enzymes are colored according to this contribution (blue – min, red – max). Heme is colored in yellow

(рис. 4) указывает на то, что во всех рассматриваемых движениях участвуют структурные элементы стероид 7 $\alpha$ -гидроксилазы, локализованные на внешней поверхности белка. Причем наибольшей амплитудой обладают остатки, формирующие канал доступа в активный центр CYP7B1. В случае же мутантной формы амплитуда соответствующих движений меньше, чем для исходного белка (рис. 4). Кроме того, анализ полученных результатов показывает, что у CYP7B1\_F470I некоторые аминокислотные остатки не дают вклад в соответствующую главную компоненту, в отличие от CYP7B1 (120–130, 230–240 и т. д.). Все это позволяет сделать вывод об увеличении жесткости пространственной структуры фермента с аминокислотной заменой Phe470Ile.

**Заключение.** В результате проведенной работы построены компьютерные модели цитохрома P450 7B1 и его мутантной формы с аминокислотной заменой Phe470Ile. Показано, что Phe470 локализован далеко от активного центра CYP7B1 и, таким образом, не может напрямую влиять на каталитические свойства фермента. В то же время установлено, что он образует сеть внутримолекулярных контактов с высоко консервативными остатками и, следовательно, является важным для формирования правильной пространственной укладки исследуемой стероид 7 $\alpha$ -гидроксилазы.

С использованием статистического подхода для анализа влияния точечной мутации на структуру белка, а также метода ускоренной молекулярной динамики показано, что мутация Phe470Ile увеличивает стабильность CYP7B1. При этом исследуемая замена не приводит к значительным изменениям пространственной структуры фермента: молекула CYP7B1\_F470I более компактная по сравнению с CYP7B1, а также обладает меньшей подвижностью отдельных элементов белка друг относительно друга. Полученный результат свидетельствует об увеличении жесткости и, как следствие этого, стабильности пространственной структуры стероид 7 $\alpha$ -гидроксилазы.

Полученные результаты могут быть использованы для изучения каталитических свойств цитохрома P450 7B1 человека с аминокислотной заменой Phe470Ile, ответственной за возникновение спастической параплегии типа 5.

**Благодарности.** Коллектив авторов выражает благодарность мл. науч. сотр. лаборатории белковой инженерии М. А. Шапиро за помощь в анализе полученных данных.

**Acknowledgments.** Authors acknowledge M. A. Shapira for assistance in analyzing the data obtained.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. CYP7B1: one cytochrome P450, two human genetic diseases, and multiple physiological functions / A. R. Stiles [et al.] // *J. Biol. Chem.* – 2009. – Vol. 284, N 42. – P. 28485–28489. <https://doi.org/10.1074/jbc.r109.042168>
2. Structure and functions of human oxysterol 7 $\alpha$ -hydroxylase cDNAs and gene CYP7B1 / Z. Wu [et al.] // *J. Lipid. Res.* – 1999. – Vol. 40, N 12. – P. 2195–2203.
3. Cyp7b1 catalyses the 7 $\alpha$ -hydroxylation of dehydroepiandrosterone and 25-hydroxycholesterol in rat prostate / C. Martin [et al.] // *Biochem. J.* – 2001. – Vol. 355, N 2. – P. 509–515. <https://doi.org/10.1042/bj3550509>
4. Cyp7b, a novel brain cytochrome P450, catalyzes the synthesis of neurosteroids 7 $\alpha$ -hydroxy dehydroepiandrosterone and 7 $\alpha$ -hydroxy pregnenolone / K. A. Rose [et al.] // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* – 1997. – Vol. 94, N 10. – P. 4925–4930. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.10.4925>
5. Immunohistochemical detection of the human cytochrome P4507B1: production of a monoclonal antibody after cDNA immunization / C. Trap [et al.] // *J. Neuroimmunol.* – 2005. – Vol. 159, N 1–2. – P. 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroim.2004.09.019>
6. An endocrine pathway in the prostate, ER $\beta$ , AR, 5 $\alpha$ -androstane-3 $\beta$ ,17 $\beta$ -diol, and CYP7B1, regulates prostate growth / Z. Weihua [et al.] // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* – 2002. – Vol. 99, N 21. – P. 13589–13594. <https://doi.org/10.1073/pnas.162477299>
7. Sequence alterations within CYP7B1 implicate defective cholesterol homeostasis in motor-neuron degeneration / M. K. Tsaousidou [et al.] // *Am. J. Hum. Genet.* – 2008. – Vol. 82, N 2. – P. 510–515. <https://doi.org/10.1016/j.ajhg.2007.10.001>
8. Identification of a new inborn error in bile acid synthesis: mutation of the oxysterol 7 $\alpha$ -hydroxylase gene causes severe neonatal liver disease / K. D. Setchell [et al.] // *J. Clin. Invest.* – 1998. – Vol. 102, N 9. – P. 1690–1703. <https://doi.org/10.1172/jci2962>
9. Analysis of CYP7B1 in non-consanguineous cases of hereditary spastic paraplegia / R. Schule [et al.] // *Neurogenetics.* – 2009. – Vol. 10, N 2. – P. 97–104. <https://doi.org/10.1007/s10048-008-0158-9>
10. Dehydroepiandrosterone 7-hydroxylase CYP7B: predominant expression in primate hippocampus and reduced expression in Alzheimer's disease / J. L. Yau [et al.] // *Neuroscience.* – 2003. – Vol. 121, N 2. – P. 307–314. [https://doi.org/10.1016/s0306-4522\(03\)00438-x](https://doi.org/10.1016/s0306-4522(03)00438-x)
11. Regulation and expression of human CYP7B1 in prostate: overexpression of CYP7B1 during progression of prostatic adenocarcinoma / M. Olsson [et al.] // *Prostate.* – 2007. – Vol. 67, N 13. – P. 1439–1446. <https://doi.org/10.1002/pros.20630>
12. CYP7B expression and activity in fibroblast-like synoviocytes from patients with rheumatoid arthritis: regulation by proinflammatory cytokines / J. Dulos [et al.] // *Arthritis Rheum.* – 2005. – Vol. 52, N 3. – P. 770–778. <https://doi.org/10.1002/art.20950>
13. Siam, A. Comparative modeling of 25-hydroxycholesterol-7 $\alpha$ -hydroxylase (CYP7B1): ligand binding and analysis of hereditary spastic paraplegia type 5 CYP7B1 mutations / A. Siam, A. Brancale, C. Simons // *J. Mol. Model.* – 2011. – Vol. 18, N 2. – P. 441–453. <https://doi.org/10.1007/s00894-011-1084-6>
14. Structural and dynamic basis of human cytochrome P450 7B1: a survey of substrate selectivity and major active site access channels / Y. L. Cui [et al.] // *Chemistry.* – 2012. – Vol. 19, N 2. – P. 549–557. <https://doi.org/10.1002/chem.201202627>
15. Zhang, Y. I-TASSER server for protein 3D structure prediction / Y. Zhang // *BMC Bioinformatics.* – 2008. – Vol. 9, N 1. – P. 40. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-9-40>
16. UCSF Chimera – a visualization system for exploratory research and analysis / E. F. Pettersen [et al.] // *J. Comput. Chem.* – 2004. – Vol. 25, N 13. – P. 1605–1612. <https://doi.org/10.1002/jcc.20084>
17. Human steroid and oxysterol 7 $\alpha$ -hydroxylase CYP7B1: substrate specificity, azole binding and misfolding of clinically relevant mutants / A. V. Yantsevich [et al.] // *FEBS J.* – 2014. – Vol. 281, N 6. – P. 1700–1713. <https://doi.org/10.1111/febs.12733>
18. Statistical analysis of the physical properties of the 20 naturally occurring amino acids / A. Kidera [et al.] // *J. Prot. Chem.* – 1985. – Vol. 4, N 1. – P. 23–55. <https://doi.org/10.1007/bf01025492>

## References

1. Stiles A. R., McDonald J. G., Bauman D. R., Russell D. W. CYP7B1: one cytochrome P450, two human genetic diseases, and multiple physiological functions. *Journal of Biological Chemistry*, 2009, vol. 284, no. 42, pp. 28485–28489. <https://doi.org/10.1074/jbc.r109.042168>
2. Wu Z., Martin K. O., Javitt N. B., Chiang J. Y. Structure and functions of human oxysterol 7 $\alpha$ -hydroxylase cDNAs and gene CYP7B1. *Journal of Lipid Research*, 1999, vol. 40, no. 12, pp. 2195–2203.
3. Martin C., Bean R., Rose K., Habib F., Seckl J. Cyp7b1 catalyses the 7 $\alpha$ -hydroxylation of dehydroepiandrosterone and 25-hydroxycholesterol in rat prostate. *Biochemical Journal*, 2001, vol. 355, no. 2, pp. 509–515. <https://doi.org/10.1042/bj3550509>
4. Rose K. A., Stapleton G., Dott K., Kiény M. P., Best R., Schwarz M., Russell D. W., Björkhem I., Seckl J., Lathe R. Cyp7b, a novel brain cytochrome P450, catalyzes the synthesis of neurosteroids 7 $\alpha$ -hydroxy dehydroepiandrosterone and 7 $\alpha$ -hydroxy pregnenolone. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1997, vol. 94, no. 10, pp. 4925–4930. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.10.4925>
5. Trap C., Nato F., Chalbot S., Kim S. B., Lafaye P., Morfin R. Immunohistochemical detection of the human cytochrome P4507B1: production of a monoclonal antibody after cDNA immunization. *Journal of Neuroimmunology*, 2005, vol. 159, no. 1–2, pp. 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroim.2004.09.019>

6. Weihua Z., Lathe R., Warner M., Gustafsson J. A. An endocrine pathway in the prostate, ERbeta, AR, 5alpha-androstane-3beta,17beta-diol, and CYP7B1, regulates prostate growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, vol. 99, no. 21, pp. 13589–13594. <https://doi.org/10.1073/pnas.162477299>
7. Tsaousidou M. K., Ouahchi K., Warner T. T., Yang Y., Simpson M. A., Laing N. G., Wilkinson P. A., Madrid R. E., Patel H., Hentati F., Patton M. A., Hentati A., Lamont P. J., Siddique T., Crosby A. H. Sequence alterations within CYP7B1 implicate defective cholesterol homeostasis in motor-neuron degeneration. *American Journal of Human Genetics*, 2008, vol. 82, no. 2, pp. 510–515. <https://doi.org/10.1016/j.ajhg.2007.10.001>
8. Setchell K. D., Schwarz M., O'Connell N. C., Lund E. G., Davis D. L., Lathe R., Thompson H. R., Weslie Tyson R., Sokol R. J., Russell D. W. Identification of a new inborn error in bile acid synthesis: mutation of the oxysterol 7alpha-hydroxylase gene causes severe neonatal liver disease. *Journal of Clinical Investigation*, 1998, vol. 102, no. 9, pp. 1690–1703. <https://doi.org/10.1172/jci2962>
9. Schüle R., Brandt E., Karle K. N., Tsaousidou M., Klebe S., Klimpe S., Auer-Grumbach M., Crosby A. H., Hübner C. A., Schöls L., Deufel T., Beetz C. Analysis of CYP7B1 in non-consanguineous cases of hereditary spastic paraplegia. *Neurogenetics*, 2009, vol. 10, no. 2, pp. 97–104. <https://doi.org/10.1007/s10048-008-0158-9>
10. Yau J. L., Rasmuson S., Andrew R., Graham M., Noble J., Olsson T., Fuchs E., Lathe R., Seckl J. R. Dehydroepiandrosterone 7-hydroxylase CYP7B: predominant expression in primate hippocampus and reduced expression in Alzheimer's disease. *Neuroscience*, 2003, vol. 121, no. 2, pp. 307–314. [https://doi.org/10.1016/s0306-4522\(03\)00438-x](https://doi.org/10.1016/s0306-4522(03)00438-x)
11. Olsson M., Gustafsson O., Skogastierna C., Tolf A., Rietz B. D., Morfin R., Rane A., Ekström L. Regulation and expression of human CYP7B1 in prostate: overexpression of CYP7B1 during progression of prostatic adenocarcinoma. *Prostate*, 2007, vol. 67, no. 13, pp. 1439–1446. <https://doi.org/10.1002/pros.20630>
12. Dulos J., van der Vleuten M. A., Kavelaars A., Heijnen C. J., Boots A. M. CYP7B expression and activity in fibroblast-like synoviocytes from patients with rheumatoid arthritis: regulation by proinflammatory cytokines. *Arthritis & Rheumatism*, 2005, vol. 52, no. 3, pp. 770–778. <https://doi.org/10.1002/art.20950>
13. Siam A., Brancale A., Simons C. Comparative modeling of 25-hydroxycholesterol-7alpha-hydroxylase (CYP7B1): ligand binding and analysis of hereditary spastic paraplegia type 5 CYP7B1 mutations. *Journal of Molecular Modeling*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 441–453. <https://doi.org/10.1007/s00894-011-1084-6>
14. Cui Y. L., Zhang J. L., Zheng Q. C., Niu R. J., Xu Y., Zhang H. X., Sun C. C. Structural and dynamic basis of human cytochrome P450 7B1: a survey of substrate selectivity and major active site access channels. *Chemistry*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 549–557. <https://doi.org/10.1002/chem.201202627>
15. Zhang Y. I-TASSER server for protein 3D structure prediction. *BMC Bioinformatics*, 2008, vol. 9, no. 1, pp. 40. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-9-40>
16. Pettersen E. F., Goddard T. D., Huang C. C., Couch G. S., Greenblatt D. M., Meng E. C., Ferrin T. E. UCSF Chimera – a visualization system for exploratory research and analysis. *Journal of Computational Chemistry*, 2004, vol. 25, no. 13, pp. 1605–1612. <https://doi.org/10.1002/jcc.20084>
17. Yantsevich A. V., Dichenko Y. V., MacKenzie F., Mukha D. V., Baranovsky A. V., Gilep A. A., Usanov S. A., Strushkevich N. V. Human steroid and oxysterol 7alpha-hydroxylase CYP7B1: substrate specificity, azole binding and misfolding of clinically relevant mutants. *FEBS Journal*, 2014, vol. 281, no. 6, pp. 1700–1713. <https://doi.org/10.1111/febs.12733>
18. Kidera A., Konishi Y., Oka M., Ooi T., Scheraga H. A. Statistical analysis of the physical properties of the 20 naturally occurring amino acids. *Journal of Protein Chemistry*, 1985, vol. 4, no. 1, pp. 23–55. <https://doi.org/10.1007/bf01025492>

### Информация об авторах

Диченко Ярослав Владимирович – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Купревича, 5/2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dichenko@iboch.by.

Гудный Евгений Сергеевич – студент. Белорусский государственный университет (ул. Курчатова, 10, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: etry@list.ru.

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

### Information about the authors

Dzichenka Yaraslau Uladzimiravich – Ph. D. (Chemistry), Senior Research. Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (5/2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dichenko@iboch.by.

Gudnyy Eugene Sergeevich – Student. Belarusian State University (10, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: etry@list.ru.

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

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 544.773.432

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-432-438>

Поступило в редакцию 11.04.2018

Received 11.04.2018

К. С. Гилевская<sup>1</sup>, А. Н. Красковский<sup>1</sup>, Е. И. Ладутько<sup>2</sup>, Г. И. Новик<sup>2</sup>,  
академик В. Е. Агабеков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

## ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ГИДРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ НАНОКОМПЗИТА ПЕКТИН-Ag, СОДЕРЖАЩИХ КАНАМИЦИН

**Аннотация.** Методом иотропного желирования получены гидрогели на основе нанокмпозита пектин-Ag, обладающие собственной антибактериальной активностью ( $MIC_{Ag} = 0,02-0,81$  мМ). Показано, что синтезированные гидрогели имеют высокую емкость по канамицину (до 70 мас. %). Полученные гидрогели обеспечивают пролонгированное высвобождение канамицина в физиологическом растворе и усиливают его антибактериальное действие (снижение МИК в 10–20 раз) за счет синергетического эффекта.

**Ключевые слова:** пектин, наночастицы серебра, «зеленая» химия, гидрогели, канамицин, синергизм

**Для цитирования:** Получение и свойства гидрогелей на основе нанокмпозита пектин-Ag, содержащих канамицин / К. С. Гилевская [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 432–438. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-432-438>

Kseniya S. Hileuskaya<sup>1</sup>, Aliaksandr N. Kraskouski<sup>1</sup>, Alena I. Ladutska<sup>2</sup>, Galina I. Novik<sup>2</sup>,  
Academician Vladimir E. Agabekov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

## PREPARATION AND PROPERTIES OF KANAMYCIN-CONTAINING HYDROGELS BASED ON PECTIN-Ag NANOCOMPOSITE

**Abstract.** The hydrogels based on nanocomposite pectin-Ag exhibiting the antibacterial activity ( $MIC_{Ag} = 0.02-0.81$  mM) were obtained by ionotropic gelation. It was shown that the synthesized hydrogels had a high capacity for kanamycin (up to 70 wt. %). The obtained hydrogels provided a prolonged release of kanamycin in 0.9 % NaCl and enhanced its antibacterial activity (MIC decreased 10–20 times) due to the synergistic effect.

**Keywords:** pectin, silver nanoparticles, “green” chemistry, hydrogels, kanamycin, synergism

**For citation:** Hileuskaya K. S., Kraskouski A. N., Ladutska A. I., Novik G. I., Agabekov V. E. Preparation and properties of kanamycin-containing hydrogels based on pectin-Ag nanocomposite. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 432–438 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-432-438>

**Введение.** Разработка новых лекарственных форм антибиотиков, в том числе пролонгированного действия, является актуальной задачей современной фармакологии. В качестве материала при разработке таких носителей могут быть использованы композиты биополимеров с наночастицами серебра. Так, известно, что природные полисахариды, например, пектины, обладают широким спектром физиологической активности и способны пролонгировать действие лекарственных соединений [1; 2]. К преимуществам неорганических наночастиц (Ag, ZnO, TiO<sub>2</sub>, Au), обладающих антимикробными свойствами, по сравнению с традиционными антибиотиками можно отнести их длительный терапевтический эффект и способность разрушать биопленки [3–5]. Кроме того, в отличие от органических антибиотиков резистентность микроорганизмов к неорганическим наночастицам не развивается. Таким образом, представляет интерес получение композиционных носителей, включающих полисахариды и неорганические наночастицы с антибактериальными свойствами.

Включение антибактериальных лекарственных соединений в такие гибридные полимер-неорганические носители позволит не только защитить действующее вещество от нежелательного разрушения в желудочно-кишечном тракте и обеспечить его пролонгированное высвобождение, но и получить новую лекарственную форму, содержащую два разных класса антибиотиков. В таких лекарственных формах может быть реализован синергизм действия антибиотиков, а также преодолена резистентность микроорганизмов [4–6].

Цель работы – получить гидрогели на основе нанокompозита пектин-Ag, в том числе содержащие канамицин, и изучить их антибактериальную активность.

**Экспериментальная часть.** Гидрогели получали методом ионотропного желирования [7] гидрозолей пектин-Ag по стандартной методике [8]. В качестве сшивающего агента использовали ионы  $\text{Ca}^{2+}$ , массовое соотношение пектин :  $\text{CaCl}_2$  составляло 1 : 10. Предварительно синтезировали гидрозоли нанокompозита пектин-Ag путем химического восстановления нитрата серебра пектином в щелочной среде при комнатной температуре [9]. Концентрация  $\text{AgNO}_3$  в реакционной смеси – 2,0 мМ. Использовали пектин высокометоксилированный цитрусовый (Пект(Citrus), степень этерификации 71 %,  $M_v = 141 \cdot 10^3$ ), низкометоксилированный (Пект(Classic), степень этерификации 35–42 %,  $M_v = 89 \cdot 10^3$ ) и низкометоксилированный амидированный (Пект(Amid), степень этерификации 32 %, степень амидирования 18 %,  $M_v = 120 \cdot 10^3$ ).

Значение  $\zeta$ -потенциала наночастиц определяли по их электрофоретической подвижности с помощью анализатора Zetasizer Nano-ZS (Malvern, Великобритания).

Канамицин (КАН) вводили в гидрогели сорбцией. Количество включенного антибиотика определяли фенол-серноокислым методом (проба Молиша) [10], анализируя супернатанты до и после сорбции. К 1 мл супернатанта приливали 1 мл 2,5 %-ного водного раствора фенола и 5 мл концентрированной серной кислоты, через 10 мин записывали спектр поглощения супернатанта на спектрофлуориметре СМ 2203 (Solar, Беларусь) в 1 см кварцевой кювете и рассчитывали концентрацию КАН в нем по предварительно построенному калибровочному графику  $A_{\lambda=480} = f(C_{\text{КАН}})$ .

Эффективность включения (ЭВ, %) КАН в гель рассчитывали по формуле

$$\text{ЭВ} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} 100 \%,$$

где  $m_0$  и  $m_1$  – масса антибиотика в исходном растворе и супернатанте соответственно (мг).

Массовую долю ( $\omega$ , %) канамицина в геле определяли по формуле

$$\omega = \frac{m_{\text{КАН}}}{m_{\text{гг}}} 100 \%,$$

где  $m_{\text{КАН}} = m_0 - m_1$  – масса (мг) канамицина в геле;  $m_{\text{гг}}$  – масса (мг) лиофильно высушенного геля, содержащего канамицин. Для получения лиофилизированных порошков использовали лиофильную сушилку Labconco FreeZone 1.0 (при  $-47,0$  °С в течение 16 ч и давлении 0,04 мбар).

Для изучения кинетики высвобождения канамицина из геля влажный осадок (2 г) в диализном мешке (размер пор 14 кДа, Sigma D9277-100FT) помещали в фосфатно-солевой буфер (ФСБ) с рН 7,4 (кислотность плазмы крови) и инкубировали при 37,0 °С (водяная баня LOIP LB-140, Россия). Для спектрофотометрического определения количества высвободившегося канамицина в течение всего процесса инкубации отбирали аликвоту (1 мл) среды, заменяя ее эквивалентным объемом свежего раствора, и после проведения пробы Молиша записывали спектр поглощения.

Антибактериальную активность полисахаридных нанокompозитов пектин-Ag и гидрогелей на их основе, в том числе содержащих канамицин, исследовали диффузионным методом «лунок», используя стандартную питательную среду (мясо-пептонный агар) для спорообразующих бактерий и стандартную питательную среду на основе гидролизата рыбной муки для грамотрицательных бактерий [11]. Минимальную ингибирующую концентрацию (МИК) определяли методом двойных десятикратных разведений в стерильных пробирках. За МИК нанокompозитов и гидрогелей на их основе, в том числе содержащих антибиотик, принимали концентрацию, приводящую к подавлению видимого роста грамположительных и грамотрицательных бактерий.

Антибактериальную активность полученных материалов изучали, используя 4 штамма грамположительных спорообразующих бактерий рода *Bacillus* (*B. pumilus* БИМ В-211, *B. pumilus* БИМ В-373, *B. subtilis* БИМ В-25, *B. subtilis* БИМ В-210) и два штамма грамотрицательных бактерий (*Pseudomonas aeruginosa* БИМ В-153 и *Escherichia coli* БИМ В-378).

**Результаты и их обсуждение.** Результаты атомно-силовой микроскопии, рентгенофазового анализа, ИК, УФ и видимой спектроскопии показали, что синтезированные методом «зеленой» химии нанокомпозиты пектин-Аg представляют собой наночастицы  $\text{Ag}^0$ , стабилизированные пектиновой оболочкой, имеют размер  $<50$  нм, сферическую форму (рис. 1) и обладают отрицательным зарядом поверхности  $-(50-70$  мВ). Высокий отрицательный заряд поверхности частиц пектин-Аg обусловлен наличием ионизированных карбоксильных групп пектина.

При взаимодействии нанокомпозитов пектин-Аg с ионами  $\text{Ca}^{2+}$  происходит формирование отрицательно заряженных гидрогелей с высоким содержанием воды ( $\sim 98$  мас. %), обусловленным способностью гидрофильных полимерных цепей пектина связывать и удерживать воду [12; 13].

Количество включенного канамицина в гидрогель Пект(Citrus)-Аg (25 : 1) прямо пропорционально его концентрации в растворе. При использовании разбавленных растворов канамицина (0,5–15 мг/мл) эффективность его включения в гели составляет  $\sim 40$  % от исходного количества вещества в растворе, а при дальнейшем увеличении концентрации до 100 мг/мл значение ЭВ уменьшается в 1,5–2,0 раза. Массовая доля включенного канамицина в гидрогель не превышает 3 мас. %, а по сухому веществу возрастает с увеличением его концентрации в растворе от 0,5 до 15,0 мг/мл, достигает 60–66 мас. % и практически не изменяется с ростом концентрации вещества в растворе вплоть до 80 мг/мл. Это обусловлено достижением максимально возможной емкости геля по канамицину.

Величина  $\zeta$ -потенциала исходных гелей равна  $-(15-17)$  мВ и практически не изменяется при включении антибиотика из его растворов с концентрацией 0,5–5,0 мг/мл. В то же время сорбция КАН из его концентрированных растворов сопровождается уменьшением по абсолютному значению величины  $\zeta$ -потенциала геля примерно в 2–3 раза (до  $-6$  мВ). Вероятно, в разбавленных растворах включение канамицина в гели происходит только за счет его сорбции и механического удержания в полимерной сетке гидрогеля, тогда как в концентрированных растворах наблюдается дополнительное электростатическое взаимодействие положительно заряженных групп ( $\text{NH}_3^+$ ) канамицина и отрицательно заряженных групп ( $\text{COO}^-$ ) пектина.

Кинетика высвобождения канамицина из гелей существенно не зависит от массового соотношения пектин : серебро в составе исходного нанокомпозита. Однако биодоступность канамицина зависит от типа нанокомпозита, входящего в состав геля. Так, из гидрогелей на основе ком-

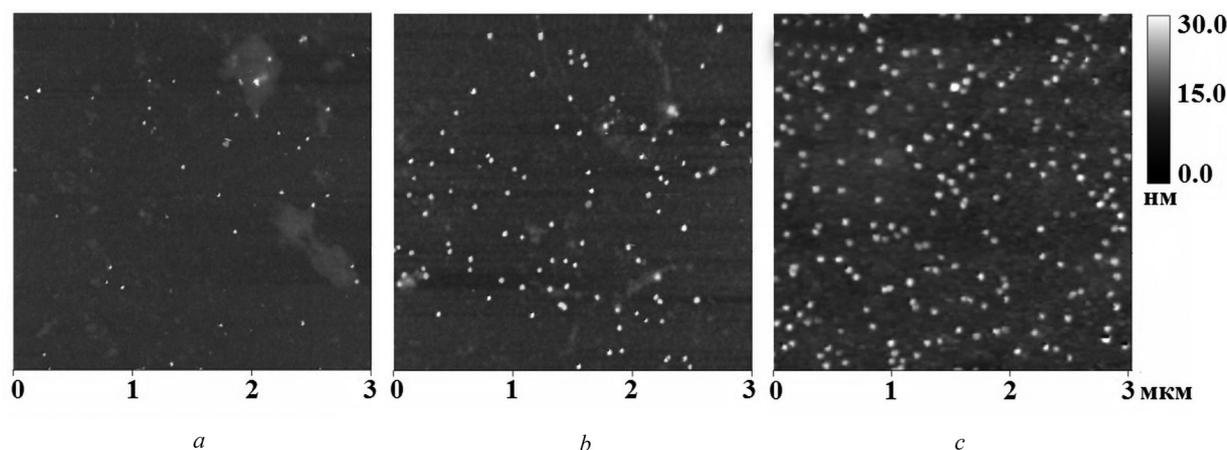


Рис. 1. АСМ-изображение нанокомпозитов Citrus-Ag (a), Classic-Ag (b) и Amid-Ag (c), синтезированных при массовом соотношении пектин : Ag = 25 : 1

Fig. 1. AFM-images of nanocomposites Citrus-Ag (a), Classic-Ag (b) и Amid-Ag (c), synthesized with pectin : Ag = 25 : 1 mass ratio

позита Amid-Ag наблюдается практически полное высвобождение (до 100 % от включенного) канамицина в течение ~6 ч. В то же время выход КАН из гидрогелей на основе Citrus-Ag и Classic-Ag достигает 50–70 % от включенного вещества в течение 100–150 мин, а затем практически не изменяется (рис. 2, кривые 1, 2). Синтезированные гидрогели являются ионотропными, их пространственная структурная сетка закреплена за счет переплетения молекул и ионных, водородных связей и гидрофобных взаимодействий, которые могут быть разрушены при изменении ионной силы и pH среды [14]. Следовательно, высвобождение канамицина может быть связано как с десорбцией, так и с разрушением полимерной матрицы. Наибольшая потеря массы после выдерживания в ФСБ характерна для гидрогелей Amid-Ag – ~90 %, что в 2–3 раза больше, чем для гидрогелей на основе Classic-Ag и Citrus-Ag. Таким образом, практически полное высвобождение канамицина из гидрогелей на основе композита Amid-Ag связано с разрушением полимерной матрицы. В случае гидрогелей Classic-Ag и Citrus-Ag частичный (2/3 от включенного) релиз вещества обусловлен главным образом изменением ионной силы среды: ослаблением электростатического взаимодействия канамицина и гидрогеля за счет экранирования их зарядов низкомолекулярными электролитами буферного раствора. Это согласуется с литературными данными по высвобождению мирамистина из частиц пектината кальция, полученными авторами [15].

Антибактериальная активность синтезированных гидрозолей и гидрогелей на их основе зависит от массового соотношения пектин : Ag в них. Так, в отношении выбранных штаммов бактерий образцы пектин-Ag (25 : 1) более активны по сравнению с пектин-Ag (10 : 1) (рис. 3). Диффузионным методом показано, что ингибирующая активность исходных гидрозолей пектин-Ag (25 : 1) в отношении штаммов *Bacillus* увеличивается в ряду Amid-Ag > Classic-Ag > Citrus-Ag. При этом антибактериальная активность гидрозоля Citrus-Ag сопоставима с действием антибиотика канамицина (рис. 3).

По отношению к штаммам грамположительных бактерий значение МИК синтезированных гидрогелей составляет 0,02–0,81 мМ и зависит от типа пектина, входящего в состав нанокompозита (таблица). Так, наибольшее ингибирующее действие проявляют гидрогели, синтезированные на основе Пект(Citrus): МИК = 0,02–0,09 мМ. Следует отметить, что полученные значения

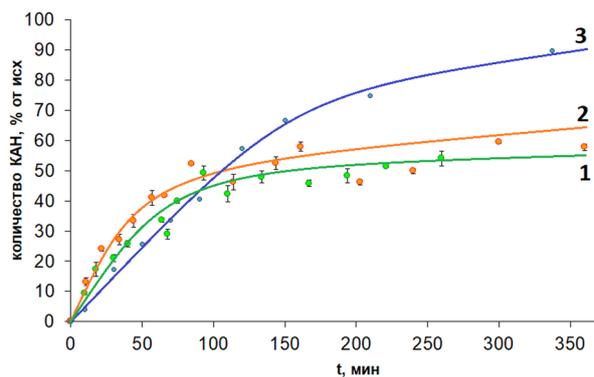


Рис. 2. Кинетика высвобождения канамицина из гидрогелей пектин-Ag (25 : 1) в ФСБ с pH 7,4 при 37 °C: 1 – Classic-Ag, 2 – Citrus-Ag, 3 – Amid-Ag

Fig. 2. Kinetics of kanamycin release from hydrogels in PBS with pH 7.4 at 37 °C: 1 – Classic-Ag (25 : 1), 2 – Citrus-Ag (25 : 1), 3 – Amid-Ag (25 : 1)

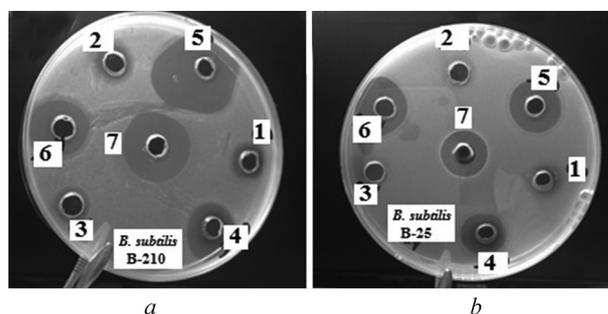


Рис. 3. Зоны ингибирования роста бактерий *B. subtilis* B-210 (a) и *B. subtilis* B-25 (b) синтезированными гидрозолями: 1 – Classic-Ag (10 : 1), 2 – Citrus-Ag (10 : 1), 3 – Amid-Ag (10 : 1), 4 – Classic-Ag (25 : 1), 5 – Citrus-Ag (25 : 1), 6 – Amid-Ag (25 : 1) и 7 – антибиотиком канамицином (1 мг/мл)

Fig. 3. Inhibition zones of the synthesized nanocomposites: 1 – Classic-Ag (10 : 1), 2 – Citrus-Ag (10 : 1), 3 – Amid-Ag (10 : 1), 4 – Classic-Ag (25 : 1), 5 – Citrus-Ag (25 : 1), 6 – Amid-Ag (25 : 1) and 7 – antibiotic kanamycin (1 mg/ml) against *B. subtilis* B-210 (a) and *B. subtilis* B-25 (b)

МИК для гидрогелей сопоставимы со значениями МИК (0,39–1,55 мМ) для исходных наноконструктов. Это свидетельствует о сохранении антибактериальной активности синтезированных частиц, входящих в состав гидрогеля.

**МИК для гелей пектин-Ag (25 : 1), в том числе содержащих канамицин, в отношении штаммов грамотрицательных и грамположительных бактерий**

**Minimum inhibitory concentrations of pectin-Ag hydrogels (25 : 1) including kanamycin-containing, against gram-negative and gram-positive bacteria**

Тип образца Sample	<i>B. subtilis</i> БИМ В-25		<i>B. pumilus</i> БИМ В-373		<i>B. subtilis</i> БИМ В-210		<i>B. pumilus</i> БИМ В-211		<i>E. coli</i> БИМ В-378	
	МИК канамици- на, мг/мл	МИК Ag, мМ	МИК канамици- на, мг/мл	МИК Ag, мМ	МИК канамици- на, мг/мл	МИК Ag, мМ	МИК канамици- на, мг/мл	МИК Ag, мМ	МИК канамици- на, мг/мл	МИК Ag, мМ
	MIC of <b>kanamycin</b> , mg/ml	MIC of Ag, mM	MIC of kanamycin, mg/ml	MIC of Ag, mM	MIC of kanamycin, mg/ml	MIC of Ag, mM	MIC of kanamycin, mg/ml	MIC of Ag, mM	MIC of kanamycin, mg/ml	MIC of Ag, mM
Канамицин	0,08	–	0,08	–	0,08	–	0,08	–	$2,6 \cdot 10^{-3}$	–
Гель Citrus-Ag	–	0,02	–	0,02	–	0,09	–	0,09	–	0,2
Гель Classic-Ag	–	0,18	–	0,18	–	0,39	–	0,39	–	0,2
Гель Amid-Ag	–	0,39	–	0,39	–	0,81	–	0,81	–	N/A
Гель Citrus-Ag + КАН	$5,6 \cdot 10^{-3}$	0,01	$5,6 \cdot 10^{-3}$	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Гель Classic-Ag + КАН	0,025	0,025	0,025	0,025	0,05	0,05	0,05	0,05	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Гель Amid-Ag + КАН	0,05	0,09	0,05	0,09	0,11	0,18	0,11	0,18	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$

Грамотрицательные бактерии обладают сопоставимой со штаммами грамположительных бактерий чувствительностью к синтезированным на основе Classic-Ag и Citrus-Ag гидрогелям: значения МИК – 0,2 мМ (таблица). Однако для гидрогелей на основе Amid-Ag не зарегистрировано ингибирования роста штаммов *Pseudomonas aeruginosa* БИМ В-153 и *Escherichia coli* БИМ В-378.

Для гидрогелей, содержащих канамицин, по сравнению с исходным антибиотиком наблюдается увеличение диаметра зон ингибирования и значительное снижение значения МИК (таблица, рис. 4). Так, для штаммов грамположительных бактерий *B. subtilis* БИМ В-25 и *B. pumilus* БИМ В-373 значение МИК по канамицину, включенному в гель на основе Пект(Citrus), снижается на порядок по сравнению со значением МИК нативного канамицина. Аналогичный эффект уменьшения МИК по канамицину для этих образцов наблюдается и в отношении грамотрицательных бактерий *E. coli* БИМ В-378 (таблица).

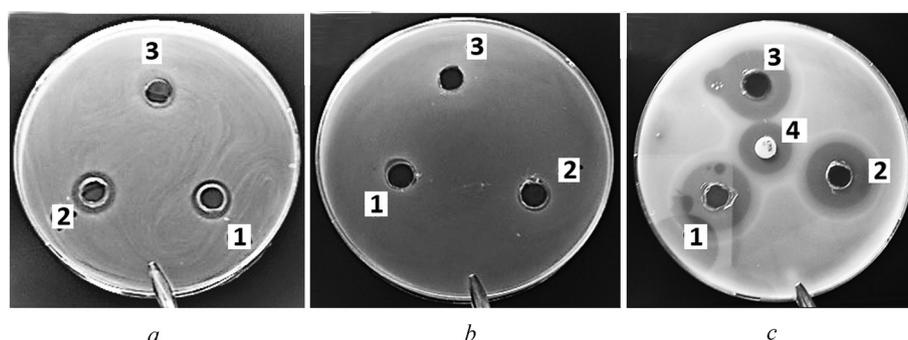


Рис. 4. Зоны ингибирования роста бактерий *E. coli* БИМ В-373 синтезированными гидрозолями (а), гидрогелями (b) и гидрогелями с канамицином (с): 1 – Classic-Ag, 2 – Citrus-Ag, 3 – Amid-Ag и 4 – антибиотиком канамицином (диск 30 мг/мл). Массовое соотношение пектин : Ag = 25 : 1

Fig. 4. Inhibition zones of the synthesized hydrosols (a), hydrogels (b) and kanamycin-containing hydrogels (c) against *E. coli* В-373: 1 – Classic-Ag, 2 – Citrus-Ag, 3 – Amid-Ag and 4 – antibiotic kanamycin (disk 30 mg/ml). Pectin : Ag = 25 : 1 mass ratio

Для гидрогелей, содержащих канамицин, по сравнению с исходными гелями в отношении грамтрицательных бактерий характерно значительное снижение МИК и по  $Ag^0$ . Так, для всех типов гелей, содержащих канамицин,  $МИК_{Ag} = 1,0 \cdot 10^{-3}$  мМ, что в 20 раз меньше, чем для исходных гидрогелей (таблица).

Таким образом, включение канамицина в гидрогели приводит к синергетическому антибактериальному эффекту. Причем в случае с гидрогелями **Citrus-Ag, содержащими канамицин, значительное уменьшение значения МИК как по  $Ag^0$ , так и по канамицину указывает на возможный потенцированный синергизм.**

**Заключение.** Методом ионотропного желирования получены гидрогели на основе наноконъюгата пектин-Ag, обладающие собственной антибактериальной активностью и пригодные для включения до 70 мас. % канамицина. Показано, что синтезированные гидрогели обеспечивают не только пролонгированное высвобождение канамицина в физиологическом растворе, но и усиление его антибактериального действия за счет синергетического эффекта.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № X16-057).

**Acknowledgements.** The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Project no. X16-057).

### Список использованных источников

1. Потиевский, Э. Г. Медицинские аспекты применения пектина / Э. Г. Потиевский, А. И. Новиков. – М.: Мед. книга, 2002.
2. Вальшев, А. В. Антимикробная активность пектинов и их производных / А. В. Вальшев // Бюллетень Оренбург. науч. центра УрО РАН. – 2013. – № 3. – 14 с.
3. Синтез и свойства наночастиц серебра: достижения и перспективы / Ю. А. Крутяков [и др.] // Успехи химии. – 2008. – Т. 77, № 3. – С. 242–269.
4. Coping with antibiotic resistance: combining nanoparticles with antibiotics and other antimicrobial agents / A. M. Allahverdiyev [et al.] // Expert Rev. Anti. Infect. Ther. – 2011. – Vol. 9, N 11. – P. 1035–1052. <https://doi.org/10.1586/eri.11.121>
5. Huh, A. J. “Nanoantibiotics”: a new paradigm for treating infectious diseases using nanomaterials in the antibiotics resistant era / A. J. Huh, Y. J. Kwon // J. controlled release. – 2011. – Vol. 156, N 2. – P. 128–145. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2011.07.002>
6. Mechanistic Study of the Synergistic Antibacterial Activity of Combined Silver Nanoparticles and Common Antibiotics / H. Deng [et al.] // Environ. Sci. Technol. – 2016. – Vol. 50, N 16. – P. 8840–8848. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00998>
7. Получение и свойства наночастиц пектината кальция / А. Н. Красковский [и др.] // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2014. – № 1. – С. 51–56.
8. Исследование антибактериальной активности гидрозолей наноконъюгатов пектин-серебро и гидрогелей на их основе / Д. Т. Плотникова [и др.] // Молодежь в науке–2016: сб. материалов Междунар. конф. молодых ученых. – Минск: Беларуская навука, 2017. – С. 50–55.
9. Получение в водных растворах пектинов стабильных золей наночастиц серебра и их свойства / К. А. Al-Muhanna Muhanna [и др.] // Коллоидный журнал. – 2015. – Т. 77, № 6. – С. 677–684.
10. Черонис, Н. Микро- и полумикрометоды органической химии / Н. Черонис. – М., 1960. – 522 с.
11. Характеристика коллекционных термофильных бактерий рода *Geobacillus* / Е. И. Ладутько [и др.] // Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты: сб. науч. тр. – Минск: Беларуская навука, 2016. – Т. 8. – С. 82–96.
12. Свойства воды в гелях гидрофильных полимеров / Н. Б. Ферапонтов [и др.] // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2011. – Т. 13, № 2. – С. 208–214.
13. Hamidi, M. Hydrogel nanoparticles in drug delivery / M. Hamidi, A. Azadi, P. Rafiei // Adv. Drug Del. Rev. – 2008. – Vol. 60, N 15. – P. 1638–1649. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2008.08.002>
14. Peppas, N. A. Preparation, structure and diffusional behavior of hydrogels in controlled release / N. A. Peppas, A. R. Khare // Adv. Drug Del. Rev. – 1993. – Vol. 11, N 1–2. – P. 1–35. [https://doi.org/10.1016/0169-409x\(93\)90025-y](https://doi.org/10.1016/0169-409x(93)90025-y)
15. Куликовская, В. И. Получение и свойства микрочастиц пектината кальция, содержащих мирамистин / В. И. Куликовская, Д. И. Егоров, В. Е. Агабеков // Докл. Нац. акад. наук Беларусі. – 2015. – Т. 59, № 6. – С. 62–66.

### References

1. Potievskij Je. G., Novikov A. I. *Medical aspects of pectin application*. Moscow, Medicinskaya kniga Publ., 2002 (in Russian).
2. Valyshev A. V. Antimicrobial activity of pectins and their derivatives. *Byulleten' Orenburgskogo nauchnogo tsentra UrO RAN [Bulletin of the Orenburg Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences]*, 2013, no. 3. 14 p. (in Russian).
3. Krutyakov Yu. A., Kudrinskiy A. A., Olenin A. Yu., Lisichkin G. V. Synthesis and properties of silver nanoparticles: advances and prospects. *Russian Chemical Reviews*, 2008, vol. 77 (3), pp. 233–257. <https://doi.org/10.1070/rc2008v077n03abeh003751>

4. Allahverdiyev A. M., Kon K. V., Abamor E. S., Bagirova M., Rafailovich M. Coping with antibiotic resistance: combining nanoparticles with antibiotics and other antimicrobial agents. *Expert review of anti-infective therapy*, 2011, vol. 9, no. 11, pp. 1035–1052. <https://doi.org/10.1586/eri.11.121>

5. Huh A. J., Kwon Y. J. “Nanoantibiotics”: a new paradigm for treating infectious diseases using nanomaterials in the antibiotics resistant era. *Journal of controlled release*, 2011, vol. 156, no. 2, pp. 128–145. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2011.07.002>

6. Deng H., McShan D., Zhang Y., Sinha S. S., Arslan Z., Ray P. C., Yu H. Mechanistic Study of the Synergistic Antibacterial Activity of Combined Silver Nanoparticles and Common Antibiotics. *Environmental Science and Technology*, 2016, vol. 50, no. 16, pp. 8840–8848. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00998>

7. Kraskouski A. N., Hileuskaya K. S., Kulikouskaya V. I., Agabekov V. E. Synthesis and properties of calcium pectinate nanoparticles. *Vestsi Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series*, 2014, no. 1, pp. 51–56 (in Russian).

8. Plotnikava D. T., Hileuskaya K. S., Kulikouskaya V. I., Novik G. I. The study of antibacterial activity of pectin-silver nanocomposites hydrozoles and hydrogeles. *Molodezh v nauke–2016: sbornik materialov Mezhdunarodnoj konferencii molodyh uchenykh [Youth in Science 2016: proceedings of the International Conference of Young Scientists]*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, pp. 50–55 (in Russian).

9. Al-Muhanna M. K. A., Hileuskaya K. S., Kulikouskaya V. I., Kraskouski A. N., Agabekov V. E. Preparation of stable sols of silver nanoparticles in aqueous pectin solutions and properties of the sols. *Colloid Journal*, 2015, vol. 77, no. 6, pp. 677–684. <https://doi.org/10.1134/s1061933x15060022>

10. Cheronis N. D. *Technique of Organic Chemistry, Vol. VI: Micro and semimicro methods*. New York, London, Interscience Publishers Inc., 1954. 628 p.

11. Ladutska A. I., Novik G. I., Smirnova M. V., Kalinina A. N. Characterization of collection thermophilic bacteria from genus *Geobacillus*. *Mikrobnye biotekhnologii: fundamental'nye i prikladnye aspekty: sbornik nauchnykh trudov [Microbial biotechnologies: fundamental and applied aspects: a collection of scientific papers]*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2016, vol. 8, pp. 82–96 (in Russian).

12. Ferapontov N. B., Vdovina S. N., Gagarin A. N., Strusovskaya N. L., Tokmachev M. G. Water properties in hydrophylic polymer gels. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznye granitsy [Condensed Matter and Interphases]*, 2011, vol. 13, no. 2, pp. 208–214 (in Russian).

13. Hamidi M., Azadi A., Rafiei P. Hydrogel nanoparticles in drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2008, vol. 60, no. 15, pp. 1638–1649. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2008.08.002>

14. Peppas N. A., Khare A. R. Preparation, structure and diffusional behavior of hydrogels in controlled release. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 1993, vol. 11, no. 1–2, pp. 1–35. [https://doi.org/10.1016/0169-409x\(93\)90025-y](https://doi.org/10.1016/0169-409x(93)90025-y)

15. Kulikouskaya V. I., Egorov D. I., Agabekov V. E. Fabrication and properties of miramistin-containing calcium pectinate microparticles. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2015, vol. 59, no. 6, pp. 62–66 (in Russian).

### Информация об авторах

*Гилевская Ксения Сергеевна* – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: k\_hilevskay@mail.ru.

*Красковский Александр Николаевич* – мл. науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: aleks.kraskovsky@gmail.com.

*Ладутько Елена Ивановна* – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Купревича, 2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ladutko\_elena@mail.ru.

*Новик Галина Ивановна* – канд. биол. наук, заведующая лабораторией. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Купревича, 2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: galina\_novik@mbio.bas-net.by.

*Агабеков Владимир Енокович* – академик, д-р хим. наук, профессор, директор. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mixa@ichnm.basnet.by.

### Information about the authors

*Hileuskaya Kseniya Sergeevna* – Ph. D. (Chemistry), Senior researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: k\_hilevskay@mail.ru.

*Kraskouski Aliaksandr Nikolaevich* – Junior researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aleks.kraskovsky@gmail.com.

*Ladutska Alena Ivanovna* – Ph. D. (Biology), Leading Researcher. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ladutko\_elena@mail.ru.

*Novik Galina Ivanovna* – Ph. D. (Biology), Head of the Laboratory. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: galina\_novik@mbio.bas-net.by.

*Agabekov Vladimir Enokovich* – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Director. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mixa@ichnm.basnet.by.

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

## БИОЛОГИЯ BIOLOGY

УДК 634.334:581.45  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-439-446>

Поступило в редакцию 10.05.2018  
Received 10.05.2018

Н. В. Гетко<sup>1</sup>, А. И. Алехна<sup>1</sup>, В. П. Субоч<sup>2</sup>, член-корреспондент В. В. Титок<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию,  
Минск, Республика Беларусь

### ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЛЕТУЧИХ КОМПОНЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ ЦИТРУСОВЫХ РАСТЕНИЙ, КУЛЬТИВИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ ОРАНЖЕРЕИ

**Аннотация.** Исследован химический состав легко летучих компонентов листьев девяти таксонов, представляющих виды и разновидности рода цитрус (*Citrus* L.), которые культивируются в условиях оранжерей Центрального ботанического сада НАН Беларуси: *C. unshiu* (Tanaka ex Swingle) Marcow., *C. grandis* Osbeck cv. Bogatyr, *C. sinensis* Osbeck cv. Navel, *C. medica* L. cv. Sarcodactilis, *C. medica* cv. Павловский шишкан, Лимон Скерневицкий ('*Ponderosa lemon*') – клон гибрида *C. medica* L. × *C. limon* (L.) Burm. f., *Citrofortunella microcarpa*, *C. limon* (L.) Osbeck cv. Павловский лимон, *C. meyeri* (Ju. Tanaka). Летучие компоненты извлекали с помощью твердофазного микроэкстрактора фирмы Supelco™, размещенного в паровоздушном пространстве над пробами воздушно сухих, мелко измельченных и нагретых до 40 °С образцов листьев. Анализ компонентного состава экстрактов осуществляли методом GC/MS с использованием системы Agilent Technologies 6850 Series II (Network GC System/5975B (VL MSD)). В листьях исследуемых цитрусовых было выявлено 36 компонентов: монотерпены (14), сесквитерпены (11), а также кислородсодержащие соединения: терпеновые спирты, альдегиды, эфиры (11). Как показали исследования, циклические углеводороды монотерпен (Z)-β-trans-Осимен и 3 сесквитерпена (β-caryophyllene, (3E,6E)-α-farnesene и α-caryophyllene) выявлены в составе летучих компонентов листьев у всей исследуемой группы цитрусовых. При этом, 2 сесквитерпена: (3E,6E)-α-farnesene и α-caryophyllene, исходя из их долей в общем объеме летучих соединений, являются для большинства таксонов доминантными. Сесквитерпен beta-Elementene присутствует в качестве доминантного компонента исключительно у видов и разновидностей, представляющих так называемую группу сладких цитрусовых: *C. unshiu*, *C. grandis* cv. Bogatyr, *C. sinensis* × cv. Navel, *C. meyeri*, что позволяет рассматривать его в качестве значимого признака в таксономии рода *Citrus* L.

**Ключевые слова:** летучие компоненты листьев, монотерпены, сесквитерпены, бета-элемен, *Citrus*

**Для цитирования:** Химический состав летучих компонентов в листьях цитрусовых растений, культивируемых в условиях оранжерей / Н. В. Гетко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 439–446. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-439-446>

Nelli V. Hetka<sup>1</sup>, Anton I. Alehna<sup>1</sup>, Victor P. Suboch<sup>2</sup>, Corresponding Member Vladimir V. Titok<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Scientific and Practical Foodstuffs Centre of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

### CHEMICAL COMPOSITION OF VOLATILE COMPONENTS IN THE LEAVES OF CITRUS PLANTS CULTIVATED UNDER GREENHOUSE CONDITIONS

**Abstract.** The article presents the results of research of the chemical composition of easily volatile components in the leaves of nine taxa representing species and varieties of the genus *Citrus* L. cultivated under the conditions of greenhouses of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus as: *C. unshiu* (Tanaka ex Swingle) Marcow., *C. grandis* Osbeck cv. Bogatyr, *C. sinensis* Osbeck cv. Washington Navel, *C. medica* L. cv. Sarcodactilis, *C. medica* cv. Pavlovskiy Shishkan, Lemon Skernevitsky ('*Ponderosa lemon*') is a clone of the hybrid *C. medica* L. × *C. limon* (L.) Burm. f., *Citrofortunella microcarpa*, *C. limon* (L.) Osbeck cv. Pavlovskiy, *C. meyeri* (Ju. Tanaka). The volatile components were extracted using a Supelco™ solid-phase microextractor placed in the vapour-air space above air-dried, finely ground and heated to 40 °C leaf samples. The component composition of the extracts was analyzed by the GC/MS method using the Agilent Technologies 6850 Series II system (Network GC System/5975B (VL MSD)). Total 36 components were identified in the leaves of citrus plants: monoterpenes (14), sesquiterpenes (11), and oxygen-containing compounds: terpene alcohols, aldehydes, ethers (11). The studies have shown that the cyclic hydrocarbons monoterpene (Z)-β-trans-Ocimene and 3 sesquiterpenes (β-caryophyllene, (3E, 6E)-α-farnesene, and α-caryophyllene) were detected in the volatile components in leaves in the

whole citrus group. While 2 sesquiterpenes: (3E,6E)- $\alpha$ -farnesene and  $\alpha$ -caryophyllene are dominant for the most taxa based on their proportions in the total volume of volatile compounds. Sesquiterpene beta-Elementene is present as a dominant component exclusively in species and varieties representing the so-called “sweet citrus” group as it follows from the results of the studies: *C. unshiu*, *C. grandis* cv. Bogatyr, *C. sinensis* × cv. Washington Navel, *C. meyeri*, which allows one to consider it as a significant feature in the taxonomy of the genus *Citrus* L.

**Keywords:** leaf volatile components, monoterpenes, sesquiterpenes, beta-Elementene, *Citrus*

**For citation:** Hetka N. V., Alehna A. I., Suboch V. P., Titok V. V. Chemical composition of volatile components in the leaves of citrus plants cultivated under greenhouse conditions. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 439–446 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-439-446>

**Введение.** Эфирные масла цитрусовых растений, являющиеся смесью легко летучих компонентов различной химической природы, широко используются в пищевой, фармацевтической и косметической индустрии в качестве ароматических, антибактериальных, противогрибковых и антиоксидантных веществ [1; 2]. Тем не менее, многие аспекты в отношении их практического использования не изучены. Это касается, прежде всего, стандартизации их состава, выявления активных компонентов и механизма их действия [3]. Актуально также и то, что летучие компоненты эфирных масел цитрусовых могут служить базой для оценки их внутривидового разнообразия, а применение современных методов GC и GC/MS позволяет в ряде случаев выявить хемотипы.

Таксономия внутри рода *Citrus* L. сложна, противоречива и запутана, в основном благодаря половой совместимости между цитрусами и близкими родами, высокой частоте почковых мутаций и длительной истории культивирования. Представители рода *Citrus* L. имеют в большинстве китайское происхождение и более чем 4000 лет истории их выращивания. Прежде всего, это касается таких видов, как *C. ichangensis* Swingle, *C. grandis* Osbeck, *C. reticulata* Blanco, *C. aurantium* L. Согласно молекулярно-генетическим исследованиям [4; 5], лишь три истинных вида: мандарин, цитрон и помело были прародителями большинства видов цитрусовых, возникших в природе путем естественной гибридизации и соматического мутагенеза.

Мандарин (*C. reticulata* Blanco.) – это редкий негибридный вид и единственный сладкий плод среди родительских видов цитрусовых. В [6] приведен обзор современных исследований, касающихся биоразнообразия, выявленного на основе молекулярно-генетического анализа в пределах рода *Citrus* L. (видов, разновидностей, гибридов). Так, у мандарина обнаружено большое число гибридов и соматических мутаций, представляющих две группы: Satsuma и Clementine (*Citrus clementina* Hort. ex Tan. – гибрид *C. reticulata* × *C. aurantium* var. *amara*). Почти все гибриды и сорта этих групп мандаринов, несмотря на наблюдаемые фенотипические различия, имеют низкий уровень генетического разнообразия и одинаковую генетическую конструкцию. Они являются соматическими мутантами и рассматриваются в настоящее время как *Citrus unshiu* Markovich (группа Satsuma) и как *Citrus species* (группа Clementine) [6; 7].

Цитрон (*C. medica* L.) является одним из самых чистых видов, поскольку для него характерно исключительно самоопыление, и он считается родителем отцовской линии любого цитрусового гибрида. Цитрон – прародитель лимона и его культиваров (*C. limon* (L.) Burm. f.). Из 56 вариаций, подвергнутых молекулярно-генетическому анализу, низкий уровень полиморфизма отмечен у лимонов, полученных клональной селекцией, и высокое генетическое разнообразие – у лимонов гибридного происхождения. При этом в 45 случаях высокое генетическое сходство обнаружено и у мутантов и у гибридов, а самыми удаленными от этой группы оказались разновидности ‘Ponderosa’ и ‘Meyer’ [6].

Помело (*C. maxima* (Burm.) Merr.) – один из родительских видов лимонов, апельсинов и грейпфрутов. Из 35 культиваров помело и грейпфрута все помело оказались моноэмбриональными и отличаются высоким уровнем полиморфизма, в то время как для грейпфрутов (*C. paradisi* Macf.) характерен низкий уровень генетических вариаций, и это предполагает их происхождение от одного родительского дерева путем почковых мутаций [6].

Сладкий апельсин (*C. × sinensis* L. Osbeck) – природный гибрид помело (*C. grandis* (Burm.) Merr.) и мандарина (*C. reticulata* Blanco), а также многие виды данного рода: померанец – *C. aurantium* L. (гибрид *C. reticulata* × *C. grandis*), грейпфрут – *C. × paradisi* Macf., и лимон – *C. limon* (L.) Burm. f. возникли в природе в результате повторных скрещиваний между мандарином, помело, цитроном и другими представителями рода *Citrus* L. [7].

Летучие компоненты культивируемых цитрусовых видов в настоящее время широко исследуются. Например, F. A. Jabalpurwala и соавт. [8] обнаружили количественные различия при сравнении состава летучих компонентов цветков грейпфрута, кислого апельсина, сладкого апельсина, лимона, мандарина, помело и лайма. Несмотря на большой экономический и медицинский потенциал цитрусовых культур, информации, касающейся летучих компонентов диких видов, все еще недостаточно.

В оранжерейной культуре Центрального ботанического сада НАН Беларуси (ЦБС) выращивается в настоящее время более 100 представителей рода *Citrus* L.: виды, разновидности и близкие к ним гибриды и сорта [9]. С учетом предполагаемых родительских видов (цитрон, мандарин, помело), мы условно объединили их в две группы: 1) гибриды и сорта цитрона (*C. medica* L.) и лимона (*Citrus limon* (L.) Burm. f.); 2) виды, разновидности, гибриды и сорта мандарина (*C. reticulata* Blanco), помело (*C. grandis* Osbeck), апельсина (*C. sinensis* Osbeck).

Цель работы – на основе анализа химического состава летучих компонентов листьев у таксонов рода *Citrus* L. дать сравнительную характеристику его разнообразию в коллекционном фонде ЦБС НАН Беларуси в оранжерейной культуре и выявить ассортимент образцов, перспективных в качестве объектов для создания композиций ароматерапевтических растений в строящейся новой экспозиционной оранжерее ЦБС НАН Беларуси.

**Материалы и методы исследований.** В качестве объектов исследований привлечены виды, естественные гибриды и близкие к ним разновидности рода *Citrus* L. (9 наименований):

*C. unshiu* (Yu. Tanaka ex Swingle) Marcov. – вид бессемянного мандарина, родом из Китая, впоследствии ввезенный в западные регионы Японии, а затем распространен по всему миру;

*C. grandis* Osbeck cv. Bogatyr. Сорт помело создан в 2013 г. в ЦБС путем отбора из числа перспективных сеянцев. Авторы – В. В. Титок, А. А. Алехна, П. А. Роговой;

*C. sinensis* Osbeck cv. Navel – самые распространенные промышленные американские сорта «пупочных» апельсинов, происхождение которых неизвестно, но наиболее вероятно – клонирование из почки, взятой на апельсиновом дереве;

*C. medica* L. Павловский шишкан – разновидность цитрона. В ботанических системах Swingle и Tanaka цитрон рассматривается как вид – *C. medica* L. [4]. Это один из четырех природных видов цитрусовых, остальные – помело, мандарин и папеда [5];

*C. medica* L. cv. Sarcodactilis – цитрон пальчатый. Экзотическая разновидность цитрона, выращиваемая в Китае и Японии. Его ароматный плод разделен на несколько долей, подобных пальцу, с малым количеством мякоти, или без мякоти, с недоразвитыми семенами (или без семян);

Клон 'Ponderosa lemon' гибрида *C. medica* L. × *C. limon* (L.) Burm.f. – лимон Скерневицкий;

*Citrofortunella microcarpa* cv. – каламондин японский пестролистный – цитрофортунелла, межродовой гибрид цитруса и подрода фортунеллы – в данном случае мандарина и кумквата. В отличие от родителей этот цитрус не имеет высоких вкусовых качеств, хотя аромат плодов прекрасен;

*C. limon* (L.) Osbeck cv. Павловский лимон. Лимон в кадках, культура которого известна еще с древних времен. В России первые лимонные деревья в комнатах выращивались еще при Петре I. Значение цитрусовых растений в комнатной культуре, особенно в районах Севера и средней полосы, чрезвычайно велико. Они декоративны и, кроме того, являются источником витаминов и сильными антибиотиками.

*C. meyeri* (Ju. Tanaka) – цитрус Мейера, межвидовой природный гибрид, полученный путем естественного скрещивания лимона и мандарина. Родина вида – Китай.

Отбор проб листьев с модельных деревьев проводили в период отрастания побегов (февраль, март). Летучие компоненты из воздушно-сухих образцов листьев извлекали с помощью твердофазного микроэкстрактора фирмы Supelco™. Его вводили в паровоздушное пространство над поверхностью размещенных в специальном флаконе и нагретых до 40 °С мелкоизмельченных, воздушно-сухих образцов листьев, и летучие компоненты накапливались на адсорбенте (волокон фирмы Supelco™).

Анализ компонентного состава экстрактов осуществляли методом GC/MS с использованием системы Agilent Technologies 6850 Series II (Network GC System /5975B (VL MSD)). Разделение компонентов проводили на капиллярной колонке HP-5MS длиной 30 м с внутренним диаметром

0,25 мм и толщиной пленки неподвижной фазы 0,25 мкм. Идентификацию каждого из компонентов осуществляли методом сравнения экспериментальных масс-спектров со спектрами базы данных и оценивали относительное содержание по площади их пиков на хроматограмме. Учитывали компоненты, содержание которых в пробах составляло более 1 % и степень совпадения экспериментальных масс-спектров с библиотечными была в пределах 95–99 %.

**Результаты и их обсуждение.** Ранее нами [10] у 15 гибридных видов, форм и сортов лимона в листьях были выявлены 22 летучие субстанции. Генотипы различались как по их числу (от 6 до 14), так и по долевному содержанию. Из монотерпенов доминантными соединениями для всей исследуемой группы таксонов являются: **D-лимонен, доля содержания которого в летучих субстанциях листьев у разных генотипов варьирует в пределах от 4 до 35 %, а также сесквитерпен β-кариофиллен, долевого содержания которого, в зависимости от генотипа, варьирует в пределах от 4 до более 45 %.** Среди кислородсодержащих соединений у таксонов данной группы цитрусовых преобладают: цитронеллаль (монотерпеновый альдегид) с ароматом лимона у 11 таксонов; цитраль (монотерпеновый ациклический альдегид) и его изомеры у 12 таксонов, гераниол (терпеновый спирт) и его эфиры (*Z,E*-геранил ацетат) характерны для большинства исследуемых сортов и гибридов лимона в качестве доминантных соединений.

Исследования летучих компонентов листьев у 9 видов, разновидностей и гибридов, *C. reticulata*, *C. sinensis*, *C. grandis* [11] показали, что среди 23 выявленных субстанций преобладают соединения класса изопреноидов – монотерпены ( $C_{10}H_{16}$ ) – изомеры пинена, мирсена карена, цимена, лимонена, оцимена, терпинена, а также сесквитерпены ( $C_{15}H_{24}$ ) – изомеры элемена, карофиллена, кадинена и фарнезена. Доля их в общем объеме компонентов различается и зависит от генотипа. Характерными и доминантными для данной исследуемой группы таксонов соединениями являются сесквитерпены: бета-элемен, бета-кариофиллен и альфа-кариофиллен [11].

М. Azam и соавт. с использованием аналогичных методов экстракции и анализа летучих компонентов провели сравнительное изучение состава летучих компонентов листьев у 16 культиваров цитрусов, в т. ч. мандарин (3), сладкий апельсин (3), помело (4), лимон (2), гибридные формы (4). Авторами показано, что стадия развития листа и генотип оказывают влияние на качественный и количественный состав летучих компонентов листьев исследуемых таксонов, а полученная информация может быть использована для промышленных и кулинарных целей [12].

Другие китайские исследователи [13] изучили влияние генетических и эволюционных факторов на химический состав и содержание летучих соединений цветков у 9 видов и разновидностей рода *Citrus* L. и их предполагаемых гибридов [13]. Были идентифицированы 94 летучие субстанции, включая различные терпены, терпеновые спирты и альдегиды, которые составили от 80 до 92 % от общего объема летучих компонентов цветков. В результате авторы пришли к заключению, что гибридные виды и разновидности в значительной степени схожи по химическому составу и количественному содержанию летучих соединений с их предполагаемыми родителями, а полученная информация оказалась полезной как для оценки и сохранения генетического потенциала, так и в таксономии рода *Citrus* L. [13].

Приведенные в данной работе результаты идентификации химического состава легко летучих компонентов, выделяемых листьями видов, естественных гибридов и близких к ним разновидностей в пределах рода *Citrus* позволяют оценить межвидовое и внутривидовое разнообразие таксонов (таблица).

Как следует из результатов, для всей изученной группы таксонов (9) выявлено 36 основных летучих субстанций, составляющих в сумме идентифицированных для каждого из них долю более 90 %, и с вариациями от 10 до 22 компонентов. Наиболее широким спектром этих соединений характеризуются листья *C. medica* cv. Павловский шишкан (22), а наименьшим – листья лимона Скерневицкого, клона 'Ponderosa lemon', гибрида *C. medica* × *C. limon* (10).

Из монотерпенов идентифицированы: (*Z*)β-trans-Ocimene у 8 таксонов, β-Pinene и D-Limonene – у 7, γ-Terpinene – у 5, p-Cymene – у 4, 3-Carene – у 2, а ±4 Carene – идентифицирован в минорном объеме только у одной разновидности – *C. grandis* cv. Bogatyr. Сесквитерпеновые углеводороды представлены доминантными соединениями: β-Caryophyllene (у всех 9 таксонов), α-Caryophyllene, (3E,6E)Farnesene (у 8 таксонов), (+)-delta-Cadinene (у 5 таксонов) и β-Elemene (у 5 таксонов).

Летучие компоненты, идентифицированные в листьях видов и разновидностей *Citrus L.*, %  
 Volatile components identified in the leaves of *Citrus L.* species and varieties, %

Время удержания, мин Retention time, min	Идентифицированные компоненты Identified components	<i>C. unshiu</i> (Tanaka ex Swingle) Marcov.	<i>C. grandis</i> Osbeck cv. Bogatyr	<i>C. sinensis</i> Osbeck cv. Navel	<i>C. medica L.</i> cv. <i>Sarcodactylis</i>	<i>C. medica L.</i> cv. Павловский шпикан	Лимон Скрепевицкий, клон <i>Ponderosa lemon</i> -гибрида <i>C. medica L.</i>	<i>Citrofortunella microcarpa</i> cv. Каламондин японский пестролистный	<i>C. limon</i> (L.) Osbeck, cv. Павловский лимон	<i>C. meyeri</i> (Ju. Tanaka)
7.905	cis-Sabinene, C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>							0,96		
7.95	β-Pinene, C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>			1,53	0,20	0,32	4,61	1,98	2,98	1,26
7.977	β-Phellandrene		19,08							
8.3	β-Myrcene, C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>		3,92	0,61	0,18	0,94		0,30	1,52	
8.694–75	3-Carene, C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>		6,79			0,71				
9.108–145	D-Limonene	0,87		13,74	3,12	13,74	19,0	0,99	7,37	
9.459–5	(Z)-β-trans-Ocimene, C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0,63	10,90	2,56	0,25	3,55		2,88	2,22	5,03
9.72–85	γ-Terpinene, C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	2,48	1,92		0,75	0,35		1,50		
10.264	p-Cimene, C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0,64			0,15	0,21		0,13		
10.276	±4 Carene, C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>		2,85							
10.45–10.494	Lynalool, C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	1,34	4,29	6,33		0,31		1,08		3,71
10.94	Neo-allo-Ocimene, C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>					0,30		0,04		
10.99	E,E-Cosmene, C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>							0,43		
11.336–414	β-Citronellal, C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O		5,60	6,46	26,59	1,37			2,61	8,96
12.526–55	-(Z)Nerol, (Z)-Geraniol		0,83	0,28	1,09		16,73		30,24	4,09
12.6–7	(R)-β-Citronellol; C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O					1,90			15,11	3,86
13.2	(E)-Citral, C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O		1,12	0,53	10,74	1,88				
13.686	n-Undecyl aldehyde, C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O				1,04					
13.913	4-[2-Chloro-6-(4-nitrophenyl)-4-pyrimidinyl] phenyl methyl ether, C <sub>17</sub> H <sub>12</sub> ClN <sub>3</sub> O <sub>3</sub>				21,04	0,13				
14.2	γ-Elemene, C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0,67						8,32		

Окончание таблицы

Время удержания, мин Retention time, min	Идентифицированные компоненты Identified components	<i>C. unshiu</i> (Tanaka ex Swingle) Masov.	<i>C. grandis</i> Osbeck cv. Bogatyr	<i>C. sinensis</i> Osbeck cv. Navel	<i>C. medica</i> L. cv. <i>Sarcodactylis</i>	<i>C. medica</i> L., cv. Павловский шпшкан	Лимон Скерлевичский, клон <i>Ponderosa lemon</i> - гибрида <i>C. medica</i> L.	<i>Citrofortunella microcarpa</i> cv. Каламондин японский пестролистный	<i>C. limon</i> (L.) Osbeck, cv. Павловский лимон	<i>C. meyeri</i> (Du. Panaka)
14.27–33	Limonol, Geranylol			0,81			1,86			5,96
14.43–56	(Z)-cis-geranyl acetate, C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>			0,53	7,64	5,96	6,10			4,35
14.577–68	Acetic acid geranyl acetate, C <sub>14</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub> , эфир					10,09	4,55			
14.7–8	Cyclopropane, 1,1-dimethyl-2-(3-methyl-1,3-butadienyl), C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>							0,49	5,47	1,12
14.91	Geranyl acetate					27,23				
15.098	β-Elemente, C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	70,26	20,20	42,27	2,53					21,90
15.38–4	Caryophyllene, C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	13,15	6,33	9,26	7,61	21,12	3,52	26,78	23,95	26,00
15.508	α-Bergamotene						21,29			
15.615	trans-Geranyl acetone						1,82			
15.7	Cis-β-Farnesene		3,73	3,32	0,22	1,44				
15.9	α-Caryophyllene	3,05	1,89	3,51	0,95	0,99		1,07	0,90	3,00
16.28	(+)-delta-Cadinene, C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	1,15		0,44	0,25	0,05		16,43		
16.369	(3E,6E)-alpha-Farnesene, C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	4,18	2,98	1,28	6,62	0,32		31,45	3,33	3,97
16.4	(S)-alpha- и beta-Bisabolene, C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>						18,34			
16.47	Isocaryophyllene, C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>					3,80				
16.54	Aromadendrene, C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>							2,37		
Итого		97,36	92,44	90,70	92,97	97,01	97,82	95,22	95,8	93,21

Из кислородсодержащих соединений у 6 таксонов в составе летучих компонентов листьев присутствуют терпеновые спирты Linalool и (Z)-Geraniol, альдегиды –  $\beta$ -Citronellal, (E)-Citral и эфиры – Geranyl acetate, (Z)-cis-Geranyl acetate.

Особое внимание обращаем на доленое содержание в составе летучих компонентов сесквитерпена бета-элемена, являющегося характерным доминантным соединением исключительно для группы сладких цитрусовых, сортов и гибридов мандарина Уншиу – *C. unshiu* (>70 %), апельсина – *C. sinensis* cv. Navel (>42 %), о чем сообщалось нами также ранее [11]. Бета-элемен в составе летучих соединений листьев выявлен и у *C. meyeri* (Ju. Tanaka) – межвидового гибрида лимона и мандарина [10].

Как показывают результаты, бета-элемен не был идентифицирован в составе летучих компонентов листьев сортов и гибридов лимона и цитрона. А у *C. medica* L. cv. Sarcodactilis – сладкой разновидности цитрона, он присутствует в незначительном доленом объеме (2,5 %).

**Заключение.** Таким образом, исследован химический состав легко летучих компонентов листьев девяти таксонов, представляющих виды и разновидности рода *Citrus* L., которые культивируются в условиях оранжерей ЦБС: *C. unshiu* (Tanaka ex Swingle) Marcov., *C. grandis* Osbeck cv. Bogatyr, *C. sinensis* Osbeck cv. Navel, *C. medica* L. cv. Sarcodactilis, клон 'Ponderosa lemon', гибрида *C. medica* L.  $\times$  *C. limon* (L.) Burm.f. – лимон Скерневицкий, *C. medica* cv. Павловский шипкан, *Citrofortunella microcarpa*, *C.  $\times$  limon* (L.) Osbeck cv. Павловский лимон, *C. meyeri* (Ju. Tanaka). В листьях исследуемых цитрусовых выявлено 36 компонентов: монотерпены (14), сесквитерпены (8), а также кислородсодержащие соединения: терпеновые спирты, альдегиды, эфиры (11). Как показали исследования, циклические углеводороды монотерпен (Z)- $\beta$ -trans-Ocimene и 3 сесквитерпена ( $\beta$ -Caryophyllene, (3E,6E)- $\alpha$ -Farnesene и  $\alpha$ -Caryophyllene) выявлены в составе летучих компонентов листьев у всей исследуемой группы цитрусовых. Два сесквитерпена: (3E,6E)- $\alpha$ -Farnesene и  $\alpha$ -Caryophyllene, исходя из их долей в общем объеме летучих соединений, являются для большинства изученных таксонов доминантными. Сесквитерпен beta-Elementene присутствует в качестве доминантного компонента исключительно у видов и разновидностей, представляющих так называемую группу сладких цитрусовых: *C. unshiu*, *C. grandis* cv. Bogatyr, *C. sinensis*  $\times$  cv. Navel, *C. meyeri*, что позволяет рассматривать его наличие в качестве значимого таксономического признака рода *Citrus* L., а также при отборе перспективных таксонов для создания ароматических экспозиций в оранжереях и интерьерах различного функционального назначения.

#### Список использованных источников

1. D-Limonene: a bioactive food component from citrus and evidence for potential role in breast cancer prevention and treatment / J. Miller [et al.] // *Oncology Reviews*. – 2011. – Vol. 5, N 1. – P. 31–42. <https://doi.org/10.4081/oncol.2011.31>
2. Volatile constituents and antioxidant activity of peel, flowers and leaf oils of *Citrus aurantium* L. growing in Greece / E. Sarrou [et al.] // *Molecules*. – 2013. – Vol. 18, N 9. – P. 10639–10647. <https://doi.org/10.3390/molecules180910639>
3. Chemical variability of peel and leaf essential oils of mandarins from *Citrus reticulata* blanco / M. L. Lota [et al.] // *Biochemical Systematics and Ecology*. – 2000. – Vol. 28, N 1. – P. 61–78. [https://doi.org/10.1016/s0305-1978\(99\)00036-8](https://doi.org/10.1016/s0305-1978(99)00036-8)
4. Moore, G. A. Oranges and lemons: clues to the taxonomy of Citrus from molecular markers / G. A. Moore // *Trends Genet.* – 2001. – Vol. 17, N 9. – P. 536–540. [https://doi.org/10.1016/s0168-9525\(01\)02442-8](https://doi.org/10.1016/s0168-9525(01)02442-8)
5. Genome-wide characterization and expression analysis of genetic variants in sweet orange / W.-B. Jiao [et al.] // *The Plant Journal*. – 2013. – Vol. 75, N 6. – P. 954–964. <https://doi.org/10.1111/tpj.12254>
6. Uzun, A. Genetic Diversity in Citrus / A. Usun, T. Yesiloglu // *Genetic Diversity in Plants* / ed. M. Çalışkan. – 2012. – P. 213–231. <https://doi.org/10.5772/32885>
7. Barrett, H. C. A numerical taxonomic study of affinity relationships in cultivated citrus and its close relatives / H. C. Barrett, A. M. Rhodes // *Systematic Botany*. – 1976. – Vol. 1, N 2. – P. 105–136. <https://doi.org/10.2307/2418763>
8. Jabalpurwala, F. A. A comparison of citrus blossom volatiles / F. A. Jabalpurwala, J. M. Smoot, R. L. Rouseff // *Phytochemistry*. – 2009. – Vol. 70, N 11–12. – P. 1428–1434. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2009.07.031>
9. Генетические ресурсы цитрусовых культур в России, Украине и Беларуси / Р. В. Кулян [и др.] // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. – 2017. – Т. 21, № 5. – С. 506–514. <https://doi.org/10.18699/vj17.21-0>
10. Сравнительный анализ летучих компонентов листьев гибридов и сортов лимона (*Citrus  $\times$  limon* (L.) Burm. f.), культивируемых в условиях оранжерей / Н. В. Гетко [и др.] // *Весці НАН Беларусі. Сер. біял. навук.* – 2014. – № 2. – С. 5–10.
11. Химический состав летучих компонентов листьев видов и сортов мандарина, апельсина, грейпфрута и помело (*Rutaceae* Juss.), культивируемых в оранжереях / Н. В. Гетко [и др.] // *Субтропическое и декоративное садоводство*. – 2017. – Т. 62. – С. 191–199.

12. Citrus leaf volatiles as affected by development stage and genetic type / M. Azam [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2013. – Vol. 14, N 9. – P. 17744–17766. <https://doi.org/10.3390/ijms140917744>
13. Variation patterns of the volatile compounds in flowers of Chinese native Citrus species and their taxonomic implications / W. Xi [et al.] // *Journal of Food and Nutrition Research*. – 2015. – Vol. 3, N 4. – P. 235–245. <https://doi.org/10.12691/jfnr-3-4-2>

## References

1. Miller J., Thompson P., Hakim I., Chow H. H. S., Thomson C. D-Limonene: a bioactive food component from citrus and evidence for potential role in breast cancer prevention and treatment. *Oncology Reviews*, 2011, vol. 5, no. 1, pp. 31–42. <https://doi.org/10.4081/oncol.2011.31>
2. Sarrou E., Chatzopoulou P., Dimassi-Theriou K., Therios I. Volatile constituents and antioxidant activity of peel, flowers and leaf oils of *Citrus aurantium* L. growing in Greece. *Molecules*, 2013, vol. 18, no. 9, pp. 10639–10647. <https://doi.org/10.3390/molecules180910639>
3. Lota M. L., Serra D. de Rocca, Tomi F., Joseph C. Chemical variability of peel and leaf essential oils of mandarins from *Citrus reticulata* blanco. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2000, vol. 28, no. 1, pp. 61–78. [https://doi.org/10.1016/S0305-1978\(99\)00036-8](https://doi.org/10.1016/S0305-1978(99)00036-8)
4. Moore G. A. Oranges and lemons: clues to the taxonomy of Citrus from molecular markers. *Trends in Genetics*, 2001, vol. 17, no. 9, pp. 536–540. [https://doi.org/10.1016/S0168-9525\(01\)02442-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9525(01)02442-8)
5. Jiao W.-B., Huang D., Xing F., Hu Yi., Deng X.-H., Xu Qi., Chen L.-L. Genome-wide characterization and expression analysis of genetic variants in sweet orange. *The Plant Journal*, 2013, vol. 75, no. 6, pp. 954–964. <https://doi.org/10.1111/tpj.12254>
6. Uzun A., Yesilogu T. Genetic Diversity in Citrus. Çalişkan M., ed. *Genetic Diversity in Plants*, 2012, pp. 213–231. <https://doi.org/10.5772/32885>
7. Barrett H. C., Rhodes A. M. A numerical taxonomic study of affinity relationships in cultivated citrus and its close relatives. *Systematic Botany*, 1976, vol. 1, no. 2, pp. 105–136. <https://doi.org/10.2307/2418763>
8. Jabalpurwala F. A., Smoot J. M., Rouseff R. L. A comparison of citrus blossom volatiles. *Phytochemistry*, 2009, vol. 70, no. 11–12, pp. 1428–1434. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2009.07.031>
9. Kulyan R. V., Samarina L. S., Rakhmangulov R. S., Kikavskii I. V., Alehna A. I. Citrus genetic resources in Russia, Ukraine, Belarus: conservation and management. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2017, vol. 21, no 5, pp. 506–514 (in Russian). <https://doi.org/10.18699/vj17.21-o>
10. Hetka N. V., Alehna A. I., Subach V. P., Pochytskaya I. M., Titok V. V. Leaf volatile components of lemon hybrids and varieties (*Citrus × limon* (L.) Burm. f.), cultivated in greenhouse conditions. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Biyalagichnaya seryya = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2014, no. 2, pp. 5–10 (in Russian).
11. Hetka N. V., Alehna A. I., Titok V. V., Subach V. P. Chemical composition of volatile components in the leaves of species and cultivars of tangerine, orange, grapefruit and pomelo (*Rutaceae* Juss.), cultivated in greenhouses. *Subtropicheskoye i dekorativnoe sadovodstvo = Subtropical and Ornamental Gardening*, 2017, vol. 62, pp. 191–199 (in Russian).
12. Azam M., Jiang Q, Zhang B., Xu C., Chen K. Citrus leaf volatiles as affected by development stage and genetic type. *International Journal of Molecular Sciences*, 2013, vol. 14, no. 9, pp. 17744–17766. <https://doi.org/10.3390/ijms140917744>
13. Xi W., Li L., Jiang D., Jiao B., Zhou Z. Variation patterns of the volatile compounds in flowers of chinese native Citrus species and their taxonomic implications. *Journal of Food and Nutrition Research*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 235–245. <https://doi.org/10.12691/jfnr-3-4-2>

## Информация об авторах

Гетко Нелли Владимировна – д-р биол. наук, доцент, заведующая лабораторией. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: N.Hetko@cbg.org.by.

Алехна Антон Иванович – ст. науч. сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: anton.alekhna@gmail.com.

Субоч Виктор Прокофьевич – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. НИЦ НАН Беларуси по продовольствию (ул. Козлова, 29, 220037, Минск, Республика Беларусь). E-mail: SubochVP@mail.ru.

Титок Владимир Владимирович – член-корреспондент, д-р биол. наук, доцент, директор. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: V.Titok@cbg.org.by.

## Information about the authors

Hetka Nelli Vladimirovna – D. Sc. (Biology), Assistant Professor, Head of the Laboratory. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2B, Sarganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: N.Hetko@cbg.org.by.

Alehna Anton Ivanovic – Senior researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2B, Sarganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: anton.alekhna@gmail.com.

Suboch Viktor Prokofievich – Ph. D. (Chemistry), Leading researcher. Food Research and Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus (29, Kozlov Str., 220037, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: SubochVP@mail.ru.

Titok Vladimir Vladimirovich – Corresponding Member, D. Sc. (Biology), Assistant Professor, Director. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2B, Sarganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: V.Titok@cbg.org.by.

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

УДК 581.192.2

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-447-454>

Поступило в редакцию 15.02.2018

Received 15.02.2018

Д. В. Кочкин<sup>1</sup>, Е. С. Глаголева<sup>1</sup>, Б. А. Галишев<sup>2</sup>, Е. В. Спиридович<sup>3</sup>,  
А. М. Носов<sup>1</sup>, академик В. Н. Решетников<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>3</sup>Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

### АНАЛИЗ ГИНЗЕНОЗИДОВ В КОРНЯХ ЖЕНЬШЕНЯ НАСТОЯЩЕГО (*PANAX GINSENG*), ИНТРОДУЦИРОВАННОГО В ЦЕНТРАЛЬНОМ БОТАНИЧЕСКОМ САДУ НАН БЕЛАРУСИ

**Аннотация.** Впервые с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии, совмещенной с масс-спектрометрией (ВЭЖХ-МС) проведено подробное изучение качественного и количественного состава гинзенозидов в корнях женьшеня настоящего (*P. ginseng* С. А. Меу.), интродуцированного в условиях Республики Беларусь (опытный участок ЦБС НАН Беларуси). Установлено, что в изученных корнях присутствуют все основные нейтральные гликозиды женьшеня (гинзенозиды Rb<sub>1</sub>, Rc, Rb<sub>2</sub>/Rb<sub>3</sub>, Rd, Rf, Rg<sub>1</sub> и Re), а также их малонилированные производные (малонил-гинзенозиды Rb<sub>1</sub>, Rc, Rb<sub>2</sub>/Rb<sub>3</sub>, Rd, Rg<sub>1</sub> и Re) и некоторые «минорные» гинзенозиды (20-глюко-гинзенозид Rf, нотогинзенозиды R<sub>1</sub> и R<sub>2</sub>, изомеры малонил-гинзенозидов Rb<sub>1</sub> и Rd). Показано также, что разные части корней *P. ginseng* существенно отличаются по суммарному содержанию гинзенозидов: для основного корня этот параметр составил 3,3 % от сухой массы, а для боковых корней – 7,8 % от сухой массы.

**Ключевые слова:** интродукция, женьшень, Аралиевые, *Panax ginseng*, Araliaceae, тритерпеновые гликозиды, гинзенозиды, ВЭЖХ-МС

**Для цитирования:** Анализ гинзенозидов в корнях женьшеня настоящего (*Panax ginseng*), интродуцированного в Центральном ботаническом саду НАН Беларуси / Д. В. Кочкин [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 447–454. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-447-454>

Dmitry V. Kochkin<sup>1</sup>, Elena S. Glagoleva<sup>1</sup>, Boris A. Galischev<sup>2</sup>, Elena V. Spiridovich<sup>3</sup>,  
Alexander M. Nosov<sup>1</sup>, Academician Vladimir N. Reshetnikov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

<sup>3</sup>Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

### ANALYSIS OF GYNZENOSIDES IN THE ROOTS OF *PANAX GINSENG* INTRODUCED IN THE CENTRAL BOTANICAL GARDEN OF NAS OF BELARUS

**Abstract.** For the first time, a detailed study of the qualitative and quantitative composition of ginsenosides in the *Panax ginseng* roots was carried out with the help of high-performance liquid chromatography combined with mass spectrometry (HPLC-MS). The plants were introduced into the conditions of the Republic of Belarus at the experimental plot of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus. It was found that in the examined roots, all basic neutral glycosides of ginseng (ginsenosides Rb<sub>1</sub>, Rc, Rb<sub>2</sub>/Rb<sub>3</sub>, Rd, Rf, Rg<sub>1</sub> and Re), as well as their malonylated derivatives (malonyl-ginsenosides Rb<sub>1</sub>, Rc, Rb<sub>2</sub>/Rb<sub>3</sub>, Rd, Rg<sub>1</sub> and Re) and some “minor” ginsenosides (20-gluco-ginsenoside Rf, notoginsenosides R<sub>1</sub> and R<sub>2</sub>, isomers of malonyl-ginsenosides Rb<sub>1</sub> and Rd) are present. The research also showed that different parts of the *P. ginseng* roots differ significantly in a total content of ginsenosides: for the main root, this parameter was 3.3 % of dry mass, and for the lateral roots – 7.8 % of dry mass.

**Keywords:** introduction, *Panax ginseng*, Araliaceae, triterpene glycosides, ginsenosides, HPLC-MS

**For citation:** Kochkin D. V., Glagoleva E. S., Galischev B. A., Spiridovich E. V., Nosov A. M., Reshetnikov V. N. Analysis of gynzenosides in the roots of *Panax ginseng* introduced in the Central Botanical Garden of the NAS of Belarus. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 447–454 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-447-454>

**Ведение.** Различные виды женьшеня (род *Panax* L., *Araliaceae*) активно используются в медицинских целях. Например, женьшень настоящий (*Panax ginseng*) является одним из наиболее востребованных лекарственных растений в традиционной медицине народов Юго-Восточной Азии [1].

Современные исследования свидетельствуют о наличии в женьшене целого спектра физиологически активных веществ [2]. Помимо тритерпеновых гликозидов – главных действующих веществ женьшеня, в нем содержатся полиацетиленовые производные, сесквитерпены, необычные аминокислоты, пептиды и ряд других биологически активных веществ [2]. Однако основными биологически активными соединениями женьшеня принято считать именно гинзенозиды – тритерпеновые гликозиды [2; 3]. Уникальными для растений рода *Panax* L. являются гинзенозиды с тетрациклическими агликонами даммаранового ряда – протопанаксадиолом и протопанаксатриолом [3]. Особый тип тритерпеновых гликозидов женьшеня составляют гинзенозиды, агликонами которых выступают производные окотиллола – продукта дополнительной модификации боковой цепи даммаранового скелета [3]. В настоящее время из различных видов женьшеня выделено более 300 индивидуальных гинзенозидов, но основные из них семь – Rb<sub>1</sub>, Rc, Rb<sub>2</sub>, Rd, Rf, Rg<sub>1</sub>, Re [2; 3]. Помимо этих гликозидов в растениях женьшеня присутствуют тритерпеновые гликозиды, имеющие пентациклический агликон на основе олеаноловой кислоты [2].

Закономерности накопления гинзенозидов в интактных растениях *P. ginseng* достаточно хорошо изучены [2; 4]. В большинстве случаев эти результаты получены при исследовании состава тритерпеновых гликозидов в растениях женьшеня настоящего, выращенных на плантациях в Корее или Китае, т. е. в географических, климатических и экологических условиях, характерных для естественных ареалов распространения этого растения [2; 4]. Между тем, особенности качественного и количественного состава гинзенозидов в растениях *P. ginseng*, выращенных в нетипичных для этого вида условиях, например в Беларуси, исследованы недостаточно. Таким образом, работы по изучению гинзенозидов в растениях женьшеня настоящего, интродуцированных в новую экологическую обстановку, являются весьма актуальными.

В Центральном ботаническом саду НАН Беларуси (ЦБС НАН Беларуси) была осуществлена интродукция в условия климата Восточно-Европейской равнины ценных лекарственных растений из разных регионов мира, в том числе женьшеня, естественные запасы которого истощены (женьшень занесен в Международную Красную книгу). Экспериментальные работы по выращиванию женьшеня в ЦБС НАН Беларуси ведутся с 1982 г., однако до недавнего времени подробное изучение состава гинзенозидов в растениях *P. ginseng*, выращенных на опытных участках сада, не проводилось.

Целью настоящей работы является детальное изучение с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии, совмещенной с масс-спектрометрией (ВЭЖХ-МС), качественного и количественного состава гинзенозидов в корнях растений *P. ginseng*, выращенных в ЦБС НАН Беларуси.

**Материалы и методы исследований.** *Объекты исследования.* В работе использовали лиофильно высушенные корни пятилетнего растения *P. ginseng* С. А. Меу., собранного на опытном участке ЦБС НАН Беларуси (Минск). Химический анализ проводили отдельно для основного и боковых корней женьшеня.

*Подготовка проб для качественного анализа тритерпеновых гликозидов.* Подготовку проб для качественного анализа тритерпеновых гликозидов в образцах корней женьшеня настоящего (навеска измельченных лиофильно высушенных корней – 5 мг) осуществляли согласно опубликованной методике [5].

*ВЭЖХ-МС (качественный анализ).* Анализ проводили на хроматографе Waters Aquity UPLC (Waters, США), оснащенном гибридным квадрупольным времяпролетным масс-спектрометром XEVO QTOF (Waters, США). Пробу в объеме 1 мкл наносили на колонку ACQUITY UPLC BEH Phenyl (50 × 2,1 мм, 1,7 мкм; Waters, США). Температура колонки составляла 40 °С, объемная скорость потока подвижной фазы – 0,4 мл/мин. В качестве подвижной фазы использовали 0,1 %-ный (по объему) раствор муравьиной кислоты в воде (растворитель А) и 0,1 %-ный (по объему) раствор муравьиной кислоты в ацетонитриле (растворитель Б). Хроматографическое разделение тритерпеновых гликозидов женьшеня проводили в режиме градиентного элюирования. В процессе анализа состав подвижной фазы менялся следующим образом (Б, % по объему): 0–1 мин – 15 %, 1–5 мин – 15 → 30 %, 5–15 мин – 30 → 38 %, 15–15,5 мин – 38 → 45 %, 15,5–23 мин – 45 %, 23–23,5 мин – 45 → 95 %. Анализ осуществляли в режиме детектирования

положительных ионов (диапазон  $m/z$  100–3000). Параметры источника ионизации: температура источника ионизации – 120 °С, температура десольвации – 250 °С, напряжение на капилляре – 3,0 кВ, напряжение на конусе ввода пробы – 30 В, скорость подачи азота (десольвационный газ) 600 л/ч. Обработку полученных результатов производили с помощью программы MassLynx (Waters, США).

*Подготовка проб для количественного анализа тритерпеновых гликозидов.* Навеску растительного материала (10 мг) экстрагировали 3 раза по 1 мл 70 %-ного (по объему) водного метилового спирта в течение 30 мин под действием ультразвука (УЗВ-12, Сапфир, Россия), после чего центрифугировали при 10000 об/мин в течение 10 мин (Микроцентрифуга МЦФ, Россия) и отбирали супернатант в грушевидную колбу. Объединенные спиртовые экстракты упаривали под вакуумом (при температуре 40 °С). Полученный экстракт суспендировали в 1 мл 5 %-ного (по объему) раствора уксусной кислоты в дистиллированной воде и наносили на патрон для твердофазной экстракции Supelclean ENVI-18 (Supelco, США). Патрон промывали 3 мл 5 %-ного (по объему) раствора уксусной кислоты в дистиллированной воде, аналиты смывали 3 мл этанола. Полученный раствор упаривали под вакуумом при 40 °С. Перед анализом экстракты растворяли в 1 мл 70 %-ного (по объему) водного метилового спирта и фильтровали с помощью нейлонового фильтра с порами 0,2 мкм (Acrodisc, Pall Corporation, США).

*ВЭЖХ-МС (количественный анализ).* Анализ осуществляли на приборе Agilent 1260 Infinity (Agilent Technologies, США), оснащенном масс-селективным детектором (6100, Agilent Technologies, США). Колонка: Poroshell 120 EC-C18 (100 мм × 3 мм, 2,7 мкм, Agilent, США). Температура колонки – 43 °С, скорость потока подвижной фазы 0,55 мл/мин.

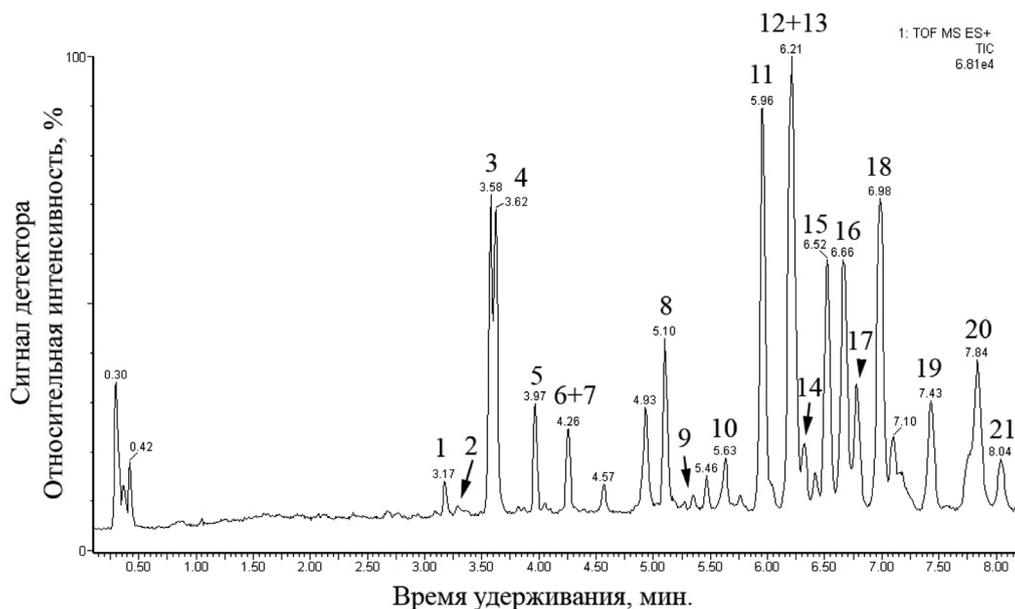
В качестве подвижной фазы использовали 0,05 %-ный (по объему) раствор муравьиной кислоты в воде (растворитель А) и ацетонитрил (растворитель Б). Хроматографическое разделение тритерпеновых гликозидов проводили в режиме градиентного элюирования. В процессе анализа состав подвижной фазы менялся следующим образом (А, % по объему): 0–1 мин – 79 %, 1–5 мин – 79 → 69 %, 5–15 мин – 69 → 62 %, 15–17 мин – 62 → 55 %, 17–25 мин – 55 %, 25–27 мин – 55 → 39 %, 27–27,5 мин – 39 → 5 %, 27,5–29,5 мин – 5 %, 29,5–30 мин – 5 → 79 %, 30–31 мин – 79 %. Анализ осуществляли в режиме детектирования отрицательных ионов. Параметры источника ионизации: температура квадруполя – 100 °С, температура газа-носителя (азот) – 150 °С, напряжение на капилляре – 4,0 кВ, скорость подачи азота (распыляющий газ) 12 л/мин.

Количественное определение содержания индивидуальных гинзенозидов проводили методом внешней калибровки против стандартных образцов гинзенозидов Rb<sub>1</sub>, Rc, Rb<sub>2</sub>, Rd, Rf, Rg<sub>1</sub>, Re (Sigma, США). Расчет содержания малонилированных гинзенозидов (малонил-Rb<sub>1</sub>, -Rc, -Rb<sub>2</sub>, -Rd, -Rg<sub>1</sub> и Re) осуществляли с использованием калибровочных кривых для соответствующих нейтральных гинзенозидов [6]. Обработку хроматограмм производили с помощью программы Open Chrom (Lablicate GmbH, Германия).

В описанных условиях проведения анализа относительное стандартное отклонение времен удерживания гинзенозидов не превышало 0,5 %. В рабочем диапазоне концентраций (2,1–200 мкг/мл) калибровочные кривые всех гинзенозидов аппроксимировались прямыми линиями с коэффициентами детерминации ( $R^2$ ) выше 0,995.

**Результаты и их обсуждение.** На первом этапе работы с помощью ВЭЖХ-МС был проведен анализ качественного состава гинзенозидов в спиртовых экстрактах из корней растений *P. ginseng*, выращенных в ЦБС НАН Беларуси. При записи хроматограмм и масс-спектров был выбран режим детектирования положительных ионов, поскольку именно в этом режиме можно получить максимальную (при единичном анализе) информацию о структуре тритерпеновых гликозидов за счет их фрагментации в источнике ионизации [7]. Полученные результаты представлены на рисунке и в табл. 1.

На полученных хроматограммах, записанных в режиме полного ионного тока, присутствовали пики не менее 21 соединения. Результаты идентификации некоторых пиков (проведена с помощью расшифровки МС-спектров, сопоставления их хроматографического поведения и МС-спектров со стандартными образцами гинзенозидов) свидетельствуют о присутствии в корнях *P. ginseng*



ВЭЖХ-МС хроматограмма (записана в режиме полного ионного тока при регистрации положительных ионов) спиртового экстракта из основного корня растения *P. ginseng*, выращенного на плантации ЦБС НАН Беларуси. Обозначения: 1 – 20-глюкозил-гинзенозид Rf; 2 – нотогинзенозид R<sub>1</sub>; 3 – гинзенозид Rg<sub>1</sub>; 4 – гинзенозид Re; 5 – малонил-гинзенозид Rg<sub>1</sub>; 6 – изо-малонил-гинзенозид Rg<sub>1</sub>; 7 – малонил-гинзенозид Re; 8 – гинзенозид Rf; 9 – нотогинзенозид R<sub>2</sub>; 10 – гинзенозид Rg<sub>2</sub>; 11 – гинзенозид Rb<sub>1</sub>; 12 – малонил-гинзенозид Rb<sub>1</sub>; 13 – гинзенозид Rc; 14 – гинзенозид R<sub>0</sub>; 15 – малонил-гинзенозид Rc; 16 – гинзенозид Rb<sub>2</sub>/Rb<sub>3</sub>; 17 – изо-малонил-гинзенозид Rb<sub>1</sub>; 18 – малонил-гинзенозид Rb<sub>2</sub>/Rb<sub>3</sub>; 19 – гинзенозид Rd; 20 – малонил-гинзенозид Rd; 21 – изо-малонил-гинзенозид Rd

HPLC-MS chromatography (within the total ion current regime when recording positive ions) of the alcohol extract of the main root of the *P. ginseng* grown at the experimental plot of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus. The notations are: 1 – 20-gluco-ginsenoside Rf, 2 – notoginsenosides R<sub>1</sub>; 3 – ginsenoside Rg<sub>1</sub>; 4 – ginsenoside Re; 5 – malonyl-ginsenoside Rg<sub>1</sub>; 6 – iso-malonyl-ginsenoside Rg<sub>1</sub>; 7 – malonyl-ginsenoside Re; 8 – ginsenoside Rf; 9 – notoginsenoside R<sub>2</sub>; 10 – ginsenoside Rg<sub>2</sub>; 11 – ginsenoside Rb<sub>1</sub>; 12 – malonyl-ginsenoside Rb<sub>1</sub>; 13 – ginsenoside Rc; 14 – ginsenoside R<sub>0</sub>; 15 – malonyl-ginsenoside Rc; 16 – ginsenoside Rb<sub>2</sub>/Rb<sub>3</sub>; 17 – iso-malonyl-ginsenoside Rb<sub>1</sub>; 18 – malonyl-ginsenoside Rb<sub>2</sub>/Rb<sub>3</sub>; 19 – ginsenoside Rd; 20 – malonyl-ginsenoside Rd; 21 – iso-malonyl-ginsenoside Rd

основных гинзенозидов группы 20(S)-протопанаксатриола (гинзенозиды Rg<sub>1</sub>, Re, Rf), 20(S)-протопанаксадиола (гинзенозиды Rb<sub>1</sub>, Rc, Rb<sub>2</sub>/Rb<sub>3</sub>, Rd, малонил-Rb<sub>1</sub>, малонил-Rb<sub>2</sub>/Rb<sub>3</sub>, -Rc, малонил-Rd) и олеаноловой кислоты (R<sub>0</sub>), а также некоторых так называемых минорных гинзенозидов (редко встречающиеся в интактных растениях, как правило, в исчезающе малых количествах) (табл. 1). Полученные результаты вполне согласуются с данными литературы [8; 9].

К общим особенностям состава гинзенозидов в исследованных корнях *P. ginseng* следует отнести наличие малонилированных производных гликозидов протопанаксадиола и протопанаксатриола (табл. 1, рисунок). Интересно, что некоторые из обнаруженных малонильных производных гинзенозидов присутствовали в корнях *P. ginseng* в виде нескольких изомерных форм (например, для гинзенозида малонил-Rg<sub>1</sub> показано наличие двух изомерных форм со временами удерживания на обращенной фазе 3,97 и 4,26 мин). Изомеры малонилированных гинзенозидов описываются в интактных растениях женьшеня довольно часто [8; 9]. До недавнего времени идентификация этих соединений была основана исключительно на данных ВЭЖХ, совмещенной с масс-спектрометрией [5]. Только в 2017 г. некоторые из этих изомеров были выделены из интактных растений и *P. ginseng* и охарактеризованы с помощью спектроскопии ядерного магнитного резонанса [10]. При этом было установлено, что разнообразие изомерных форм малонилированных гинзенозидов определяется присоединением малоновой кислоты к первичным гидроксильным группам разных остатков глюкозы (например, в углеводных цепях у C3-/C6- и/или C20-гидроксильных групп агликона), а также к различным гидроксильным группам одного остатка глюкозы (прежде всего, к C4- или C3-гидроксильным группам глюкозы) [10]. При этом стоит заметить, что пока трудно судить, являются ли все изомерные формы гинзенозидов натив-

Т а б л и ц а 1. Результаты ВЭЖХ-МС анализа (регистрация положительных ионов) спиртового экстракта из основного корня растения *P. ginseng*, выращенного на опытном участке ЦБС НАН БеларусиT a b l e 1. Results of the HPLC-MS analysis (recording of positive ions) of the alcohol extract of the main root of *P. ginseng* grown at the experimental plot of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus

$t_R$ , мин <sup>1</sup>	Молекулярная формула Molecular formula	$[M+H]^+$ , $m/z^2$	$[M+Na]^+$ , $m/z^2$	Осколочные ионы, $m/z$ Fragment ions	Название Title
3,17	$C_{48}H_{82}O_{19}$	963,5643 (963,5529)	985,5399 (985,5348)	945; 783; 765; 747; 441; 621; 603; 423; 405	20-Глюкозил-гинзенозид Rf
3,28	$C_{47}H_{80}O_{18}$	933,5464 (933,5423)	955,5278 (955,5242)	915; 771; 753; 735; 639; 621; 441; 423; 405	Нотогинзенозид R <sub>1</sub>
3,58	$C_{42}H_{72}O_{14}$	801,4955 (801,5000)	823,4840 (823,4820)	783; 765; 621; 603; 441; 423; 405	Гинзенозид Rg <sub>1</sub>
3,62	$C_{48}H_{82}O_{18}$	947,5502 (947,5579)	959,5357 (959,5399)	929; 913; 767; 749; 441; 423; 405	Гинзенозид Re
3,97	$C_{45}H_{74}O_{17}$	887,4976 (887,5004)	909,4787 (909,4824)	869; 707; 689; 671; 441; 423; 405	Малонил-гинзенозид Rg <sub>1</sub>
4,26	$C_{45}H_{74}O_{17}$	887,4979 (887,5004)	909,4863 (909,4824)	869; 707; 689; 671; 621; 441; 423	Изо-малонил-гинзенозид Rg <sub>1</sub>
4,26	$C_{51}H_{84}O_{21}$	1033,5668 (1033,5583)	1055,5439 (1055,5403)	1015; 767; 749; 441; 423; 405	Малонил-гинзенозид Re
5,10	$C_{42}H_{72}O_{14}$	801,4922 (801,5000)	823,4856 (823,4820)	783; 765; 747; 621; 603; 441; 423; 405; 3481	Гинзенозид Rf
5,34	$C_{41}H_{70}O_{13}$	771,5032 (771,4895)	793,4980 (793,4714)	753; 735; 621; 441; 423; 405;	Нотогинзенозид R <sub>2</sub>
5,63	$C_{42}H_{72}O_{13}$	785,4933 (785,4973)	807,4977 (807,4871)	767; 749; 441; 423; 405	Гинзенозид Rg <sub>2</sub>
5,96	$C_{54}H_{92}O_{23}$	1109,6182 (1109,6108)	1131,5946 (1131,5927)	1091; 947; 929; 785; 767; 425	Гинзенозид Rb <sub>1</sub>
6,21	$C_{57}H_{94}O_{26}$	1195,6141 (1195,6112)	1217,6069 (1217,5931)	1177; 425;	Малонил-гинзенозид Rb <sub>1</sub>
6,26	$C_{53}H_{90}O_{22}$	1079,5991 (1079,6002)	1101,5918 (1101,5821)	1061; 899; 767; 425	Гинзенозид Rc
6,31	$C_{48}H_{76}O_{19}$	957,5060 (957,5059)	979,4888 (979,4879)	939; 795; 777; 633; 439	Гинзенозид R <sub>0</sub>
6,52	$C_{56}H_{92}O_{25}$	1165,5950 (1165,6006)	1187,5968 (1187,5825)	1147; 853; 425;	Малонил-гинзенозид-Rc
6,66	$C_{53}H_{90}O_{22}$	1079,6096 (1079,6002)	1101,5781 (1101,5821)	1061; 917; 899; 767; 755; 637; 619; 425	Гинзенозид Rb <sub>2</sub> /Rb <sub>3</sub>
6,78	$C_{57}H_{94}O_{26}$	1195,5990 (1195,6112)	1217,6162 (1217,5931)	1177; 425	Изо-малонил-гинзенозид Rb <sub>1</sub>
6,98	$C_{56}H_{92}O_{25}$	1165,6083 (1165,6006)	1187,6001 (1187,5825)	1147; 853; 425	Малонил-гинзенозид- Rb <sub>2</sub> /Rb <sub>3</sub>
7,43	$C_{48}H_{82}O_{18}$	947,5630 (947,5579)	969,5447 (969,5399)	767; 425;	Гинзенозид Rd
7,84	$C_{51}H_{84}O_{21}$	1033,5626 (1033,5583)	1055,5497 (1055,5403)	853; 835; 425	Малонил-гинзенозид Rd
8,03	$C_{51}H_{84}O_{21}$	1033,5554 (1033,5583)	1055,5481 (1055,5403)	853; 835; 425	Изо-Малонил-гинзенозид Rd

Пр и м е ч а н и е: <sup>1</sup> – время удерживания, мин; <sup>2</sup> – в скобках указаны расчетные значения  $m/z$  для соответствующего иона.

Note: <sup>1</sup> – retention time, min; <sup>2</sup> – calculated values of  $m/z$  of an appropriate ion (in brackets).

ными соединениями и/или некоторые из них образуются в результате вызванной условиями экстракции внутримолекулярной миграции ацильной группы [8; 9].

Таким образом, можно предположить, что обнаруженные в корнях растений *P. ginseng*, выращенных в нетипичных для этого вида условиях (интродукция ЦБС НАН Беларуси), соединения также являются позиционными изомерами, различающимися положением остатка малонил-

вой кислоты. Однако для установления их точной структуры требуются дополнительные исследования.

В табл. 2 представлены результаты определения содержания основных гинзенозидов в корнях растений *P. ginseng*, выращенных на плантации ЦБС НАН Беларуси. Установлено, что разные части корней *P. ginseng* существенно отличаются по суммарному содержанию гинзенозидов: для основного корня этот параметр составил 3,3 % от сухой массы, а для боковых корней – 7,8 % от сухой массы. Этот результат вполне согласуется с данными литературы [3; 11]. Действительно, во многих исследованиях показано, что боковые корни (их часто именуют «тонкими» корнями женьшеня) *P. ginseng* часто характеризуются (при сравнении с основным корнем) наибольшим содержанием гинзенозидов [3; 11].

Т а б л и ц а 2. Содержание основных гинзенозидов в корнях *P. ginseng* (плантация ЦБС НАН Беларуси)

Table 2. Content of the main ginsenosides of the roots of *P. ginseng* grown at the experimental plot of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus

Гинзенозид Ginsenoside	Содержание, мг/г сухой массы Content, mg / g dry weight	
	Основной корень Main root	Боковые корни Lateral roots
Rg <sub>1</sub>	6,3	5,4
Re	1,3	5,3
Малонил-Rg <sub>1</sub>	0,7	0,7
Малонил-Re	–	0,2
Rf	2,1	2,3
Rb <sub>1</sub>	3,3	8,4
Rc	1,2	3,7
Rb <sub>2</sub>	1,5	4,6
Rd	0,2	1,4
Малонил-Rb <sub>1</sub>	8,9	20,4
Малонил-Rc	2,6	11,2
Малонил-Rb <sub>2</sub> /Rb <sub>3</sub>	3,3	12,5
Малонил-Rd	0,3	1,9
R <sub>0</sub>	1,6	0,4
Сумма, мг/г сухой массы	33,3	78,4

Следует отметить, что существенную долю в суммарном содержании гинзенозидов составляют малонилированные производные этих соединений: в основном корне малонил-гинзенозиды составляют 47,6 %, а в боковых конях – 59,8 % от суммы гликозидов. Среди этих ацилированных форм гинзенозидов в количественном отношении преобладают малонил-гликозиды протопанаксадиола (малонил-Rb<sub>1</sub>, -Rc, -Rb<sub>2</sub>/Rb<sub>3</sub> и -Rd). Малонилированные формы гинзенозидов группы протопанаксатриола (малонил-Rg<sub>1</sub>, -Re) обнаруживаются в существенно меньших количествах (табл. 2). Описанные закономерности также довольно часто отмечаются для корней разных видов женьшеня (в том числе женьшеня настоящего) [12; 13].

**Закключение.** Таким образом, впервые проведено достаточно подробное изучение качественного и количественного состава гинзенозидов в корнях растений женьшеня настоящего, интродуцированных в условиях Республики Беларусь. При этом установлено, что в изученных корнях присутствуют все основные нейтральные гликозиды женьшеня (гинзенозиды Rb<sub>1</sub>, Rc, Rb<sub>2</sub>/Rb<sub>3</sub>, Rd, Rf, Rg<sub>1</sub>, Re), а также их малонилированные производные и некоторые «минорные» гинзенозиды (20-глюко-гинзенозид Rf, нотогинзенозиды R<sub>1</sub> и R<sub>2</sub>, изомеры малонил-гинзенозидов Rb<sub>1</sub> и Rd). Количественное содержание обнаруженных основных гинзенозидов в корнях растений *P. ginseng*, выращенных на опытных участках ЦБС НАН Беларуси, сопоставимо с их содержанием в образцах корней этого растения китайского или корейского происхождения.

**Благодарности.** Авторы выражают признательность В. В. Титку – директору ЦБС НАН Беларуси, Л. В. Кухаревой – вед. науч. сотруднику, Т. В. Гиль – науч. сотруднику лаборатории биоразнообразия растительных ресурсов ЦБС НАН Беларуси за помощь и содействие в исследованиях. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований 16-54-00158 Бел\_а и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № 16Р-083.

**Acknowledgements.** The authors are grateful to V. V. Titko, Director of the Central Botanical Garden of NAS of Belarus, L. V. Kukhareva, leading researcher and T. V. Gil, researcher of the Laboratory of Biodiversity of Plant Resources of the Central Botanical Garden of NAS of Belarus for help and assistance in research. The work is financially supported by the grant 16-54-00158 Bel\_a of the Russian Foundation for Fundamental Research and the grant 16P-083 of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Shin, B.-K. Chemical diversity of ginseng saponins from *Panax ginseng* / B.-K. Shin, S. W. Kwon, J. H. Park // Journal of Ginseng Research. – 2015. – Vol. 39, N 4. – P. 287–298. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2014.12.005>
2. Court, W. E. The Principal Active Chemicals in *Panax* Species / W. E. Court // Ginseng, the Genus *Panax*. – London: CRC Press, 2000. – P. 55–116.
3. Christensen, L. P. Ginsenosides: chemistry, biosynthesis, analysis, and potential health effects // Advances in Food and Nutrition Research. – 2008. – Vol. 55. – P. 1–99. [https://doi.org/10.1016/s1043-4526\(08\)00401-4](https://doi.org/10.1016/s1043-4526(08)00401-4)
4. Qi, L. W. Ginsenosides from American ginseng: chemical and pharmacological diversity / L. W. Qi, C. Z. Wang, C. S. Yuan // Phytochemistry. – 2011. – Vol. 72, N 8. – P. 689–699. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2011.02.012>
5. Rare triterpene glycoside of ginseng (ginsenoside malonyl-Rg1) detected in plant cell suspension culture of *Panax japonicus* var. *repens* / D. V. Kochkin [et al.] // Russian Journal of Plant Physiology. – 2017. – Vol. 64, N 5. – P. 649–656. <https://doi.org/10.1134/s102144371705003x>
6. Chemical and bioactive comparison of flowers of *Panax ginseng* Meyer, *Panax quinquefolius* L., and *Panax notoginseng* Burk. / F. Li [et al.] // Journal of Ginseng Research. – 2017. – Vol. 41, N 5. – P. 487–495. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2016.08.008>
7. Single-run HPLC/ESI-LITMS profiling of ginsenosides in plant extracts and ginseng based products / A. Stavriani [et al.] // Biomedical Chromatography. – 2015. – Vol. 29, N 6. – P. 853–859. <https://doi.org/10.1002/bmc.3364>
8. Rapid separation and identification of 31 major saponins in Shizhu ginseng by ultra-high performance liquid chromatography–electron spray ionization–MS/MS / T.-T. Sun [et al.] // Journal of Ginseng Research. – 2016. – Vol. 40, N 3. – P. 220–228. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2015.07.008>
9. Complete (1)H-NMR and (13)C-NMR spectral assignment of five malonyl ginsenosides from the fresh flower buds of *Panax ginseng* / Y.-S. Wang [et al.] // Journal of Ginseng Research. – 2016. – Vol. 40, N 3. – P. 245–250. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2015.08.003>
10. Malonylginsenosides with Potential Antidiabetic Activities from the Flower Buds of *Panax ginseng* / S. Qiu [et al.] // J. Nat. Prod. – 2017. – Vol. 80, N 4. – P. 899–908. <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.6b00789>
11. Determination of ginsenosides in Asian and American ginsengs by liquid chromatography–quadrupole/time-of-flight MS: assessing variations based on morphological characteristics / Y. Chen [et al.] // Journal of Ginseng Research. – 2017. – Vol. 41, N 1. – P. 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2015.12.004>
12. The effects of dynamic changes of malonyl ginsenosides on evaluation and quality control of *Panax ginseng* C. A. Meyer / Z. Liu [et al.] // Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis. – 2012. – Vol. 64–65. – P. 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2012.02.005>
13. Du, X. W. Changes in neutral and malonyl ginsenosides in American ginseng (*Panax quinquefolium*) during drying, storage and ethanolic extraction / X. W. Du, R. B. H. Wills, D. L. Stuart // Food Chemistry. – 2004. – Vol. 86, N 2. – P. 155–159. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.11.003>

### References

1. Shin B.-K., Kwon S. W., Park J. H. Chemical diversity of ginseng saponins from *Panax ginseng*. *Journal of Ginseng Research*, 2015, vol. 39, no. 4, pp. 287–298. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2014.12.005>
2. Court W. E. The Principal Active Chemicals in *Panax* Species. *Ginseng, the Genus Panax*. London, CRC Press, 2000, pp. 55–116.
3. Christensen L. P. Ginsenosides: chemistry, biosynthesis, analysis, and potential health effects. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2008, vol. 55, pp. 1–99. [https://doi.org/10.1016/s1043-4526\(08\)00401-4](https://doi.org/10.1016/s1043-4526(08)00401-4)
4. Qi L. W., Wang C. Z., Yuan C. S. Ginsenosides from American ginseng: chemical and pharmacological diversity. *Phytochemistry*, 2011, vol. 72, no. 8, pp. 689–699. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2011.02.012>
5. Kochkin D. V., Galishev B. A., Glagoleva E. S., Titova M. V., Nosov A. M. Rare triterpene glycoside of ginseng (ginsenoside malonyl-Rg1) detected in plant cell suspension culture of *Panax japonicus* var. *repens*. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2017, vol. 64, no. 5, pp. 649–656. <https://doi.org/10.1134/s102144371705003x>
6. Li F., Lv C., Li Q., Wang J., Song D., Liu P., Zhang D., Lu J. Chemical and bioactive comparison of flowers of *Panax ginseng* Meyer, *Panax quinquefolius* L., and *Panax notoginseng* Burk. *Journal of Ginseng Research*, 2017, vol. 41, no. 5, pp. 487–495. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2016.08.008>
7. Stavriani A., Rodin I., Braun A., Stekolshchikova E., Shpigun O. Single-run HPLC/ESI-LITMS profiling of ginsenosides in plant extracts and ginseng based products. *Biomedical Chromatography*, 2015, vol. 29, no. 6, pp. 853–859. <https://doi.org/10.1002/bmc.3364>

8. Sun T.-T., Liang X.-L., Zhu H.-Y., Peng X.-L., Guo X.-J., Zhao L.-S. Rapid separation and identification of 31 major saponins in Shizhu ginseng by ultra-high performance liquid chromatography–electron spray ionization–MS/MS. *Journal of Ginseng Research*, 2016, vol. 40, no. 3, pp. 220–228. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2015.07.008>

9. Wang Y.-S., Jin Y.-P., Gao W., Xiao S.-Y., Zhang Y.-W., Zheng P.-H., Wang J., Liu J.-X., Sun C.-H., Wang Y.-P. Complete (1)H-NMR and (13)C-NMR spectral assignment of five malonyl ginsenosides from the fresh flower buds of *Panax ginseng*. *Journal of Ginseng Research*, 2016, vol. 40, no. 3, pp. 245–250. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2015.08.003>

10. Qiu S., Yang W. Z., Yao C. L., Shi X. J., Li J. Y., Lou Y., Duan Y. N., Wu W. Y., Guo D. A. Malonylginsenosides with Potential Antidiabetic Activities from the Flower Buds of *Panax ginseng*. *Journal of Natural Products*, 2017, vol. 80, no. 4, pp. 899–908. <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.6b00789>

11. Chen Y., Zhao Z., Chen H., Brand E., Yi T., Qin M., Liang Z. Determination of ginsenosides in Asian and American ginsengs by liquid chromatography–quadrupole/time-of-flight MS: assessing variations based on morphological characteristics. *Journal of Ginseng Research*, 2017, vol. 41, no. 1, pp. 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2015.12.004>

12. Liu Z., Li Y., Li X., Ruan C.-C., Wang L.-J., Sun G.-Z. The effects of dynamic changes of malonyl ginsenosides on evaluation and quality control of *Panax ginseng* C. A. Meyer. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2012, vol. 64–65, pp. 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2012.02.005>

13. Du X. W., Wills R. B. H., Stuart D. L. Changes in neutral and malonyl ginsenosides in American ginseng (*Panax quinquefolium*) during drying, storage and ethanolic extraction. *Food Chemistry*, 2004, vol. 86, no. 2, pp. 155–159. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.11.003>

### Информация об авторах

*Кочкин Дмитрий Владимирович* – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (Ленинские горы, 1/12, 119234, Москва, Российская Федерация). E-mail: dmitry-kochkin@mail.ru.

*Глаголева Елена Сергеевна* – науч. сотрудник. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (Ленинские горы, 1/12, 119234, Москва, Российская Федерация). E-mail: \_yuga@mail.ru.

*Галишев Борис Александрович* – инженер-исследователь. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (ул. Куйбышева, 48, 620083, Екатеринбург, Российская Федерация). E-mail: galishev@mail.ru.

*Спиридович Елена Владимировна* – канд. биол. наук, доцент, заведующая лабораторией. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2В, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: e.spiridovich@cbg.org.by.

*Носов Александр Михайлович* – д-р биол. наук, профессор, заведующий кафедрой. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (Ленинские горы, 1/12, 119234, Москва, Российская Федерация). E-mail: al\_nosov@mail.ru.

*Решетников Владимир Николаевич* – академик, д-р биол. наук, профессор, заведующий отделом. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2В, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.reshetnikov@cbg.org.by.

### Information about the authors

*Kochkin Dmitry Vladimirovich* – Ph. D. (Biology), Senior researcher. Lomonosov Moscow State University (1/12, Leninskie gory, 119234, Moscow, Russian Federation). E-mail: dmitry-kochkin@mail.ru.

*Glagoleva Elena Sergeevna* – Researcher. Lomonosov Moscow State University (1/12, Leninskie gory, 119234, Moscow, Russian Federation). E-mail: \_yuga@mail.ru.

*Galishev Boris Aleksandrovich* – Engineer-researcher. Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (48, Kuibyshev Str., 620083, Yekaterinburg, Russian Federation). E-mail: galishev@mail.ru.

*Spiridovich Elena Vladimirovna* – Ph. D. (Biology), Assistant Professor, Head of the Laboratory. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2В, Sarganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: e.spiridovich@cbg.org.by.

*Nosov Alexander Mikhailovich* – D. Sc. (Biology), Professor, Head of the Department. Lomonosov Moscow State University (1/12, Leninskie gory, 119234, Moscow, Russian Federation). E-mail: al\_nosov@mail.ru.

*Reshetnikov Vladimir Nikolaevich* – Academician, D. Sc. (Biology), Professor, Head of the Department. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2В, Sarganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: V.Reshetnikov@cbg.org.by.

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

УДК 577  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-455-462>

Поступило в редакцию 10.07.2018  
Received 10.07.2018

**П. В. Кузмицкая, О. Ю. Урбанович, академик А. В. Кильчевский**

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

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕНОВ, КОДИРУЮЩИХ СТРЕСС-АССОЦИИРОВАННЫЕ БЕЛКИ, СОДЕРЖАЩИЕ ДОМЕНЫ A20/AN1, В ГЕНОМЕ ЯБЛОНИ *IN SILICO* И АНАЛИЗ ИХ ФИЛОГЕНЕТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ**

**Аннотация.** Стресс-ассоциированные белки (SAP, от англ. stress-associated proteins) представляют собой транскрипционные факторы с цинковыми пальцами, содержащие домены A20 и (или) AN1. В геноме яблоны домашней сорта Golden Delicious выявлены гены, кодирующие гипотетические SAP. Каждый из них содержит как минимум один домен цинковых пальцев AN1. Проведена оценка филогенетических взаимоотношений гипотетических SAP из генома яблоны с гомологами из других видов (на примере двудольного хлопчатника и однодольного риса) на основании их аминокислотных последовательностей. Анализ нуклеотидной структуры регионов, расположенных перед генами, кодирующими SAP, свидетельствует о вовлеченности стресс-ассоциированных белков в сложную сеть взаимодействия регуляторных белков, управляющих жизнедеятельностью растительных клеток. Исходя из выявленных мотивов, можно предположить, что экспрессия стресс-ассоциированных белков у яблоны происходит, вероятнее всего, непрерывно, однако изменения условий произрастания растения могут приводить к увеличению ее уровня. Регуляция экспрессии SAP может меняться в зависимости от стадии онтогенеза растения и отличаться в разных его органах. Об этом свидетельствует наличие сайтов связывания для транскрипционных факторов, участвующих в формировании органов растения, определении времени прохождения стадий онтогенеза и др. Наличие сайтов связывания для регуляторных элементов, влияющих на устойчивость растений к неблагоприятным условиям, позволяет предполагать, что экспрессия SAP у яблоны, так же, как и у других изученных растений, будет изменяться в ответ на стресс.

**Ключевые слова:** стресс-ассоциированные белки, яблоны, гены, идентификация

**Для цитирования:** Кузмицкая, П. В. Идентификация генов, кодирующих стресс-ассоциированные белки, содержащие домены A20/AN1, в геноме яблоны *in silico* и анализ их филогенетических связей / П. В. Кузмицкая, О. Ю. Урбанович, А. В. Кильчевский // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 455–462. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-455-462>

**Polina V. Kuzmitskaya, Oksana Yu. Urbanovich, Academician Aleksandr V. Kilchevsky**

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

## **IDENTIFICATION OF GENES ENCODING STRESS-ASSOCIATED PROTEINS CONTAINING THE DOMAINS A20/AN1 IN THE APPLE GENOME *IN SILICO* AND ANALYSIS OF THEIR PHYLOGENETIC RELATIONSHIP**

**Abstract.** Stress-associated proteins (SAPs) are the transcription factors containing the zinc-finger domains A20 and/or AN1. Genome-wide identification and characterization of an apple variety of Golden Delicious stress-associated proteins was performed, potential SAPs were found. Each of them contains, at least, one zinc-finger domain AN1. A phylogenetic tree was constructed on the basis of the amino acid sequences of apple SAP and homologues from other species (dicotyledonous cotton and monocotyledonous rice) to assess their phylogenetic relationships. The sequences ahead of the translation initiation site of SAPs genes were analyzed to discover *cis*-elements involved in the gene expression regulation. The analysis shows that apple SAPs are involved in a complex network of regulatory elements that controls the vitality of plant cells. It can be assumed that the expression of SAPs in apple trees occurs constantly, but if conditions of a plant growth are changed, their level increases. Regulation of the SAP expression may depend on a plant ontogenesis stage and it may vary in different tissues.

**Keywords:** stress-associated proteins, apple, genes, identification

**For citation:** Kuzmitskaya P. V., Urbanovich O. Yu., Kilchevsky A. V. Identification of genes encoding stress-associated proteins containing the domains A20/AN1, in the apple genome *in silico* and analysis of their phylogenetic relationship. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 455–462 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-455-462>

**Введение.** Гены, отвечающие за реакцию растений на стресс, обеспечивают их защиту двумя способами. Часть из них кодирует метаболические белки, защищающие растение, другая часть – гены, продукты которых участвуют в регуляции сигнальных путей. К первой группе относятся шапероны, белки позднего эмбриогенеза, осмотины, белки-антифризы, мРНК-связывающие белки, детоксификационные ферменты, транспортеры, белки, участвующие в транспортировке липидов, ферменты, участвующие в биосинтезе осмопротекторов и др. Вторая группа представлена регуляторными белками. К ним относятся транскрипционные факторы, регулирующие экспрессию генов, отвечающих за реакцию растения на стресс. Они могут функционировать совместно, формируя генные сети. К регуляторным белкам также относят киназы, белковые фосфатазы, кальмодулин-связывающий белок, ферменты, участвующие в метаболизме фосфолипидов и др. Поиск и изучение генов, кодирующих транскрипционные факторы, имеет большое значение, поскольку они способны влиять на множество генов, участвующих в ответе на различные виды стресса. В частности, было показано, что трансгенные растения, у которых повышен уровень экспрессии некоторых из регуляторных генов, кодирующих транскрипционные факторы, обладали более высокой устойчивостью к стрессовым условиям.

Стресс-ассоциированные белки (SAP, от англ. stress-associated proteins) представляют собой транскрипционные факторы с цинковыми пальцами, содержащие домены A20 и(или) AN1. Впервые домен A20 был обнаружен у цитокинин-индуцируемого белка A20 эндотелиальных клеток пупочной вены человека [1]. Этот белок индуцируется фактором некроза опухоли (TNF) и ингибирует апоптоз, вызванный TNF [2]. Другой домен цинковых пальцев, AN1, впервые был обнаружен в структуре убиквитин-подобного белка, выделенного из анимального полюса икры и эмбрионов на ранних стадиях развития *Xenopus laevis* [3]. Хотя на сегодняшний день биохимические функции домена AN1 точно не установлены, известно, что у человека белок ZNF216, содержащий домен AN1, взаимодействует с белком TRAF6 (TNF receptor-associated factor 6) [4]. Уровни экспрессии генов, кодирующих белки с доменами A20/AN1, изменяются под воздействием стресса у животных и растений. Изучение паттернов экспрессии SAP свидетельствует о том, что уровень их транскриптов резко повышается на ранних стадиях реализации ответа на абиотический стресс, а затем снижается в течение 6–12 ч [5]. Помимо этого показано, что SAP участвуют в ответе на заражение, регуляции синтеза фитогормонов и сигнальной трансдукции и других процессах, протекающих в растительной клетке [6–8].

Одной из важнейших культур для стран умеренного климатического пояса, к которым относится Беларусь, является яблоня. Ее продуктивность зависит от условий выращивания и может снижаться в результате воздействия неблагоприятных факторов. Идентификация генов, участвующих в реализации ответа на стресс, может значительно расширить возможности селекции. В представленной работе мы провели идентификацию генов, кодирующих SAP, в геноме яблони домашней сорта Golden Delicious *in silico*, анализ структурной организации гипотетических SAP из генома яблони, оценку их промоторных областей и изучение их филогенетических взаимоотношений с гомологами из других видов.

**Материалы и методы исследования.** Нуклеотидные и гипотетические белковые последовательности генов яблони (*Malus × domestica*, сорт Golden Delicious) были получены из базы данных Genome Database for Rosaceae (<https://www.rosaceae.org/>), последовательности хромосом – из базы данных NCBI GenBank. Белковые HMM-модели доменов были загружены из базы данных PFAM (AN1 – PF01428, A20 – PF01754). Каждая из них была использована для поиска совпадений среди гипотетических белковых последовательностей яблони с помощью hmmer3 (<http://hmmer.org/>). Обнаруженные потенциальные совпадения были протестированы путем сканирования с помощью SMART (<http://smart.embl-heidelberg.de/>). Последовательности, содержащие домены A20 и (или) AN1, рассматривались как кандидаты на роль стресс-ассоциированных белков.

Молекулярная масса, изоэлектрическая точка и внутриклеточная локализация каждого из гипотетических стресс-ассоциированных белков яблони рассчитаны с помощью сервиса <http://linux1.softberry.com/>. Для изучения регуляторных элементов генов, кодирующих потенциальные SAP яблони, проведен анализ последовательности ДНК длиной 2000 п. н. выше первого кодона (в тех случаях, когда их удалось идентифицировать). Выявление цис-регуляторных элементов проводили с помощью PlantPAN 2.0 (<http://plantpan2.itps.ncku.edu.tw/>).

Для проведения филогенетического анализа аминокислотных последовательностей стресс-ассоциированных белков из базы данных GenBank были загружены последовательности SAP риса в соответствии со списком, представленным [9], последовательности стресс-ассоциированных белков диплоидного хлопчатника (*Gossypium raimondii*) были загружены с сайта Cotton Genome Project (<http://cgp.genomics.org.cn>) соответственно [10]. Выравнивания последовательностей проводили с помощью алгоритма ClustalW. Филогенетическое дерево было построено методом максимального правдоподобия в программе Mega 6.

**Результаты и их обсуждение. Идентификация генов, кодирующих SAP, в геноме яблони до-машней.** Поиск генов, кодирующих SAP, был проведен с помощью ПО hmmer3 и HMM-профилей, загруженных из базы данных PFAM. Подтверждение принадлежности генов-кандидатов к семейству SAP было выполнено с помощью SMART. В общей сложности мы обнаружили 21 ген, каждый из которых кодирует белок, содержащий как минимум один домен цинковых пальцев AN1. Выравнивание аминокислотных последовательностей гипотетических белков SAP яблони представлено на рис. 1.

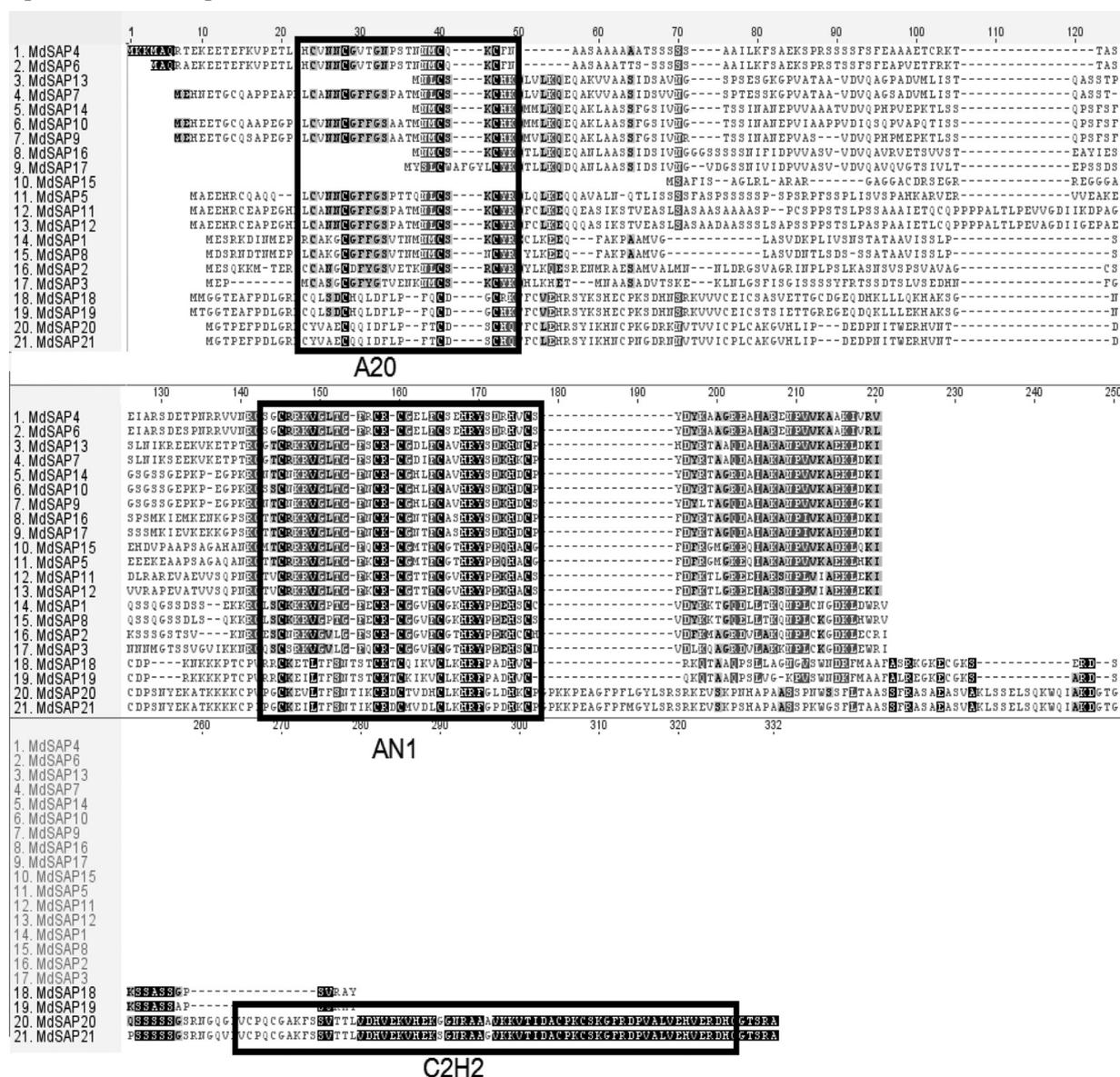


Рис. 1. Консервативные домены SAP яблони. Идентичные аминокислоты выделены черным фоном. Рамками отмечены мотивы цинковых пальцев

Fig. 1. Conserved domains in apple SAP. Identical amino acids are shown against a black background. Conserved domains are high lined with boxes

Из их числа у 12 гипотетических белков N-конец содержит домен цинковых пальцев A20, C-конец – домен AN1, что является наиболее характерной структурой для SAP растений. Два белка имеют комбинацию AN1–AN1, и столько же – AN1–C2H2. У пяти белков имеется только по одному домену AN1. **Примечательно, что в геноме яблони не были обнаружены гены, кодирующие SAP, имеющие только домены A20.** Это же характерно и для других двудольных растений (арабидопсиса, томата, хлопчатника), но не для риса, относящегося к классу однодольных.

Гипотетические SAP яблони являются щелочными и имеют длину от 109 до 293 аминокислотных остатков (молекулярный вес 11,5–32 кДа). Расчетные изоэлектрические точки колеблются в пределах 6,51–9,66. Результаты оценки клеточной локализации *in silico* показывают, что 12 гипотетических SAP находятся в цитоплазме, 9 – секретируются (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Характеристики гипотетических SAP яблони

T a b l e 1. Characteristics of apple putative SAP

Название гена Name of the gene	Тип цинковых пальцев Type of zinc fingers	Длина белка, число аминокислотных остатков Length of protein, number of amino acid residues	pI	Молекулярная масса, Да Molecular weight, Da	Локализация в клетке Localization in the cell	Хромосома, на которой расположен соответствующий ген Chromosome on which the corresponding gene is located
MdSAP1	A20–AN1	151	8,79	16532,99	Цитоплазматический	
MdSAP2	A20–AN1	162	9,08	17721,36	Секретируется	2
MdSAP3	A20–AN1	156	8,63	17078,34	Цитоплазматический	2
MdSAP4	A20–AN1	169	9,31	18420,79	Секретируется	2
MdSAP5	A20–AN1	170	9,04	18599,11	Цитоплазматический	
MdSAP6	A20–AN1	165	9,21	18090,33	Секретируется	7
MdSAP7	A20–AN1	171	8,47	18168,71	Цитоплазматический	7
MdSAP8	A20–AN1	150	8,77	16405,64	Цитоплазматический	7
MdSAP9	A20–AN1	169	8,00	18075,45	Цитоплазматический	11
MdSAP10	A20–AN1	172	8,00	18300,74	Цитоплазматический	11
MdSAP11	A20–AN1	187	6,92	20010,84	Секретируется	
MdSAP12	A20–AN1	189	6,51	20092,92	Секретируется	
MdSAP13	AN1	142	8,94	15142,34	Цитоплазматический	2
MdSAP14	AN1	142	8,94	15302,42	Цитоплазматический	3
MdSAP15	AN1	109	9,66	11582,27	Цитоплазматический	
MdSAP16	AN1	146	8,41	15782,92	Цитоплазматический	6
MdSAP17	AN1	149	8,08	16023,27	Цитоплазматический	14
MdSAP18	AN1–AN1	193	9,04	21390,38	Секретируется	9
MdSAP19	AN1–AN1	192	9,06	21394,50	Секретируется	17
MdSAP20	AN1–C2H2	293	8,72	32041,33	Секретируется	12
MdSAP21	AN1–C2H2	293	8,64	32033,43	Секретируется	

**Филогенетический анализ SAP яблони.** Для оценки филогенетических взаимоотношений гипотетических SAP из генома яблони с гомологами из других видов (на примере двудольного хлопчатника и однодольного риса) на основании их аминокислотных последовательностей было построено филогенетическое древо, представленное на рис. 2. Последовательности SAP, кодируемые тремя видами, можно разделить на четыре группы. В первую, самую многочисленную, входят в общей сложности 24 последовательности белка, из которых 7 – из хлопчатника, 9 – из риса и 8 – из яблони. Большинство из них имеет комбинацию доменов цинковых пальцев A20–AN1, реже встречаются белки, имеющие только домены AN1: таких было обнаружено 3 (по одному для каждого из видов). Также в этот кластер входит SAP18, обнаруженный у риса, примечательный тем, что у него имеется только домен A20. Подобные белки не были обнаружены у яблони и хлопчатника. SAP18 из риса имеет наибольшее число отличий от других стресс-ассоциированных белков. Среди членов этого кластера следует отметить SAP6D, SAP7D из хлопчатника, для которых было показано повышение уровня экспрессии при воздействии на растение высоких и низких температур, засоления, а также при обработке полиэтиленгликолем [10].

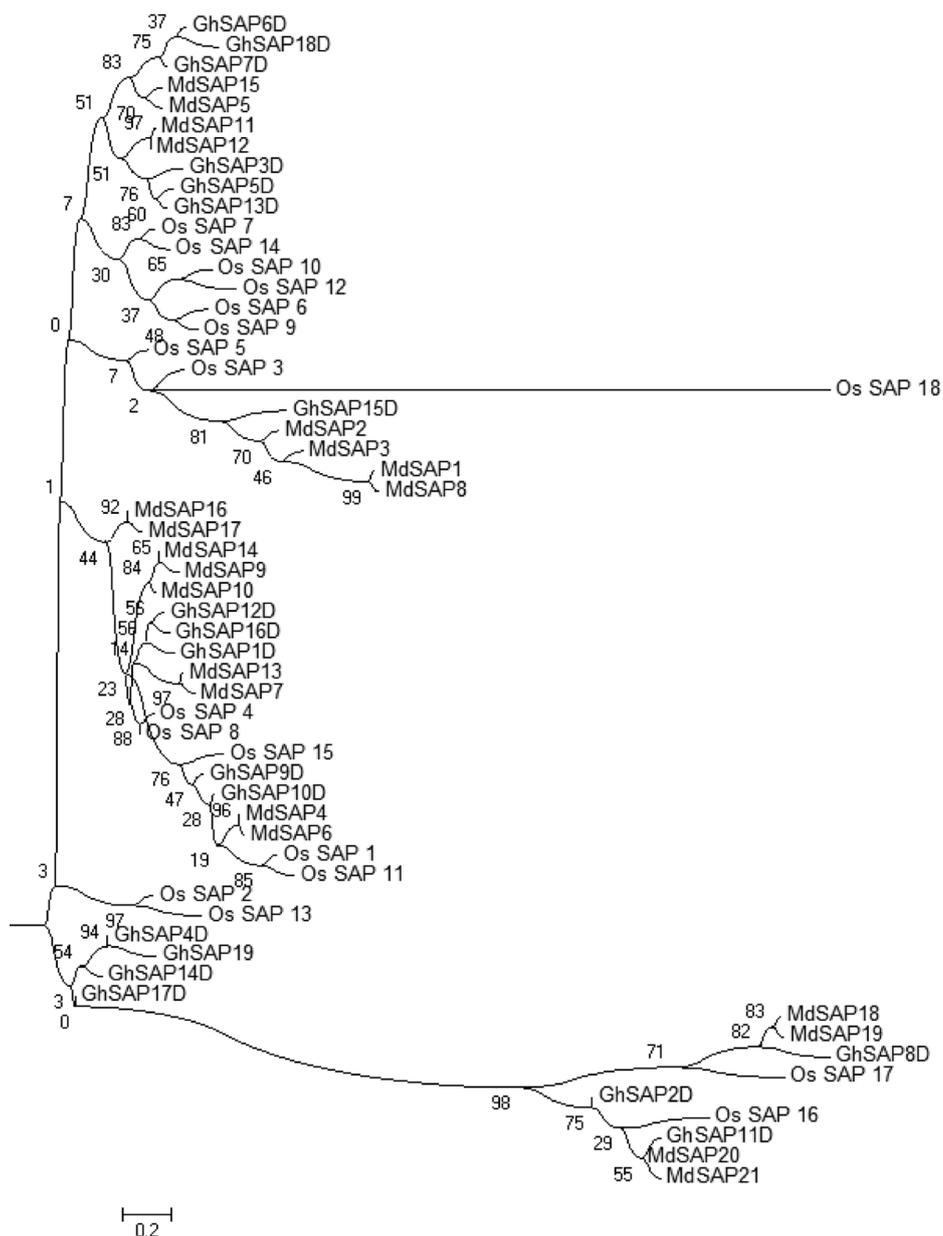


Рис. 2. Филогенетические взаимоотношения SAP, обнаруженных в геномах яблони (Md), хлопка (Gh) и риса (Os). Древо построено программой Mega6 методом максимального правдоподобия. Цифры на ветвях отражают значения бутстрэпа

Fig. 2. Phylogenetic analysis of SAP from apple (Md), cotton (Gh) and rice (Os) genomes. A maximum likelihood tree was generated by Mega6. Bootstrap values are indicated on branches

Во второй кластер входят 9 белков яблони, 5 – хлопчатника и 5 – риса. Анализ их доменной структуры показал, что среди них также преобладают SAP, содержащие домены A20–AN1, но некоторые представители этой группы имеют только домены AN1, причем большинство из них (4) были белками яблони, один – риса. Белки хлопчатника с такой структурой в эту группу не вошли.

Третий, самый малочисленный, кластер объединяет 4 белка из хлопчатника и 2 – из риса. По одному белку из каждого генома имели мотив цинковых пальцев AN1, для прочих было характерно сочетание доменов A20–AN1. В этот кластер входит OsSAP1 из риса, для которого показано участие в регуляции ответа на абиотический стресс, а также взаимодействие с аминотрансферазой и OsSCP (белок, связанный с патогенезом) [9].

Четвертый кластер, наиболее удаленный в эволюционном отношении от описанных выше, объединяет все белки, для которых характерна комбинация двух доменов AN1 либо сочетание доменов AN1 и C2H2. Среди них 4 белка из генома яблони, 3 белка из генома хлопчатника и 2 белка из генома риса.

*Идентификация гипотетических цис-элементов в промоторных областях генов, кодирующих SAP яблони.* Анализ последовательностей, расположенных непосредственно перед первым кодоном генов, кодирующих стресс-ассоциированные белки, показал, что регуляция их экспрессии может осуществляться множеством транскрипционных факторов, вовлеченных в разнообразные биологические процессы (табл. 2). Так, на их экспрессию могут влиять стадия жизненного цикла растения, на что указывают характерные последовательности ДНК, с которыми могут связываться гены, содержащие гомеодомен, MADS-box, транскрипционные факторы семейства WRKY, TCP, LOB, GATA, SBP, C2H2 и др. **Индукция экспрессии SAP может опосредованно запускаться растительными гормонами**, о чем свидетельствует наличие последовательностей для связывания транскрипционных факторов EIN3, AP2, SBP, V3, MYB и др., кальмодулином (на это указывают мотивы, с которыми могут связываться транскрипционные факторы с доменом CG-1). Кроме того, на регуляцию экспрессии SAP может влиять свет. В пользу этого предположения говорит наличие сайтов связывания транскрипционных факторов, принадлежащих к семействам MYB, bZIP и bHLH, **члены которых участвуют в интеграции транскрипционного ответа на изменение освещения**. Отдельные регуляторные белки, потенциально способные связываться с последовательностями, расположенными перед генами, кодирующими SAP, участвуют в ответе на стресс. Например, транскрипционные факторы, принадлежащие к семействам WRKY, C2H2, CG-1 и AP2 являются частью системы защиты растений от засухи, холода, засоления, низких температур, а также патогенов [11].

Т а б л и ц а 2. Регуляторные элементы, обнаруженные в промоторных областях генов, кодирующих гипотетические SAP яблони домашней

Table 2. Regulatory elements found in the apple SAP promoter regions

Промоторная область гена Promoter region of the gene	AP2	AT-Hook	V3	V3	bHLH	bZIP	C2H2	CG-1	CSD	EIN3	GATA	GRAS	HD-Zip	Гомеодомен	LOB	MADF	MADS box	Myb/SANT	NAC, NAM	SBP	SBP	TBP	TCP	TCR	WRKY
MdSAP2	+	+	+		+	+	+		+	+	+			+		+	+	+	+			+	+	+	+
MdSAP3	+	+	+	+	+	+	+		+		+			+		+	+	+	+		+	+	+	+	+
MdSAP4		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+		+	+	+	+		+	+	+	+	
MdSAP5	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+
MdSAP6	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+		+	+	+	+		+	+	+	+	+
MdSAP7	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+			+		+	+	+	+		+	+	+	+	+
MdSAP9	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+		+	+	+	+			+	+	+	+
MdSAP10	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+			+		+	+	+	+		+	+	+	+	+
MdSAP12	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+		+		+	+			+	+	+	+
MdSAP16	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+			+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+
MdSAP17	+	+	+	+	+	+	+		+	+				+		+	+	+	+		+	+	+	+	+
MdSAP18	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+		+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+
MdSAP19	+	+	+	+	+	+	+	+			+			+		+	+	+	+		+	+	+	+	+
MdSAP20	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+			+		+	+	+	+		+	+	+	+	+

Таким образом, анализ нуклеотидной структуры регионов, расположенных перед генами, кодирующими SAP, свидетельствует о вовлеченности стресс-ассоциированных белков в сложную сеть взаимодействия регуляторных белков, управляющих жизнедеятельностью растительных клеток. Исходя из выявленных мотивов, можно предположить, что экспрессия стресс-ассоциированных белков у яблони происходит, вероятнее всего, непрерывно, однако изменения условий произрастания растения могут приводить к увеличению ее уровня. Регуляция экспрессии SAP может меняться в зависимости от стадии онтогенеза растения и отличаться в разных его органах. Об этом свидетельствует наличие сайтов связывания для транскрипционных факторов, участвующих в формировании органов растения, определении времени прохождения стадий

онтогенеза и др. Наличие сайтов связывания для регуляторных элементов, влияющих на устойчивость растений к неблагоприятным условиям, позволяет предполагать, что экспрессия SAP у яблони, так же как и у других изученных растений, будет изменяться в ответ на стресс. Большинство мотивов, обнаруженных непосредственно перед генами, кодирующими SAP, были обнаружены во всех (или у подавляющего большинства) случаях. К таким относятся домены AP2, AT-Hook, bHLH, bZIP, C2H2, CSD, TSR, EIN3, GATA, гомеодомен, MADF, Myb/SANT, NAC, TCP, WRKY, TBP, MADS, B3, SBP. Гораздо реже встречались мотивы, характерные только для нескольких SAP. Среди них последовательность, предназначенная для связывания транскрипционных факторов GRAS (участвуют в рецепции и интеграции сигналов окружающей среды, а также в реализации эндогенных программ) [11], SOX (было показано его участие в реализации онтогенетических программ у животных) [12], LOB (участвует в регуляции развития органов растения, регенерации, созревании пыльцы, реализации ответа на проникновение патогенов и метаболизме антоцианина и азота), HD-Zip (вовлечены в регуляцию роста и развития растений, фотоморфогенеза, цветения, созревания плодов и адаптационный ответ на стресс путем интеграции внешних и эндогенных гормональных сигналов), последовательность для связывания домена CG-1 [11]. Он характерен для транскрипционных факторов CAMTA, содержащих кальмодулин-связывающий домен и анкириновые повторы, возможно, являющиеся связующим звеном между индуцируемыми стрессом изменениями внутриклеточного уровня кальция и последующей регуляцией экспрессии генов. Полученные результаты соотносятся с данными исследований экспрессии SAP на других объектах (томате, хлопчатнике, рисе), в которых было показано, что большинство из них экспрессируется на низком уровне в нормальных условиях, но при воздействии стресса их экспрессия может значительно возрастать [9; 10; 13].

Таким образом, в геноме яблони домашней сорта Golden Delicious были выявлены гены, кодирующие гипотетические SAP. В их последовательностях были обнаружены характерные домены цинковых пальцев A20/AN11. Анализ структурных особенностей генов, их промоторных областей и кодируемых ими белков свидетельствует о вовлечении их в сложную сеть взаимодействия, способную реагировать на изменения окружающей среды. Оценка филогенетических взаимоотношений гипотетических SAP яблони и других растений указывает на общность их организации и структуры. Полученные данные будут являться основой для дальнейшего экспериментального изучения роли SAP яблони в ответе на стресс и выделения генов-кандидатов для селекции сортов, имеющих повышенную устойчивость к стрессовым воздействиям.

#### Список использованных источников

1. Tumor necrosis factor-alpha induction of novel gene products in human endothelial cells including a macrophage-specific chemotaxin / V. M. Dixit [et al.] // J. Biol. Chem. – 1990. – Vol. 265, N 5. – P. 2973–2978.
2. Oipari, A. W. The A20 cDNA induced by tumor necrosis factor alpha encodes a novel type of zinc finger protein / A. W. Oipari, Jr., M. S. Boguski, V. M. Dixit // J. Biol. Chem. – 1990. – Vol. 265, N 25. – P. 14705–14708.
3. Identification and cloning of localized maternal RNAs from *Xenopus* eggs / M. R. Rebagliati [et al.] // Cell. – 1985. – Vol. 42, N 3. – P. 769–777. [https://doi.org/10.1016/0092-8674\(85\)90273-9](https://doi.org/10.1016/0092-8674(85)90273-9)
4. ZNF216 Is an A20-like and IκB Kinase γ-Interacting Inhibitor of NFκB Activation / J. Huang [et al.] // J. Biol. Chem. – 2004. – Vol. 279, N 16. – P. 16847–16853. <https://doi.org/10.1074/jbc.m309491200>
5. Mukhopadhyay, A. Overexpression of a zinc-finger protein gene from rice confers tolerance to cold, dehydration, and salt stress in transgenic tobacco / A. Mukhopadhyay, S. Vij, A. K. Tyagi // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 2004. – Vol. 101, N 16. – P. 6309–6314. <https://doi.org/10.1073/pnas.0401572101>
6. Redox-dependent regulation of the stress-induced zinc-finger protein SAP12 in *Arabidopsis thaliana* / E. Stroher [et al.] // Mol. Plant. – 2009. – Vol. 2, N 2. – P. 357–367. <https://doi.org/10.1093/mp/ssn084>
7. An A20/AN1-type zinc finger protein modulates gibberellins and abscisic acid contents and increases sensitivity to abiotic stress in rice (*Oryza sativa*) / Y. Zhang [et al.] // J. Exp. Bot. – 2016. – Vol. 67, N 1. – P. 315–326. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv464>
8. Rice SAPs are responsive to multiple biotic stresses and overexpression of OsSAP1, an A20/AN1 zinc-finger protein, enhances the basal resistance against pathogen infection in tobacco / H. Tyagi [et al.] // Plant Sci. – 2014. – Vol. 225. – P. 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.05.016>
9. Vij, S. Genome-wide analysis of the stress associated protein (SAP) gene family containing A20/AN1 zinc-finger(s) in rice and their phylogenetic relationship with *Arabidopsis* / S. Vij, A. K. Tyagi // Mol. Genet. Genomics. – 2006. – Vol. 276, N 6. – P. 565–575. <https://doi.org/10.1007/s00438-006-0165-1>

10. Genome-wide identification and expression analysis of stress-associated proteins (SAPs) containing A20/AN1 zinc finger in cotton / W. Gao [et al.] // *Mol. Genet. Genomics*. – 2016. – Vol. 291, N 6. – P. 2199–2213. <https://doi.org/10.1007/s00438-016-1252-6>
11. *Plant Transcription Factors* / ed. D. H. Gonzalez. – Boston: Academic Press, 2016. – 422 p. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-19051-4>
12. Wegner M. All purpose Sox: The many roles of Sox proteins in gene expression / M. Wegner // *Int. J. Biochem. Cell Biol.* – 2010. – Vol. 42, N 3. – P. 381–390. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2009.07.006>
13. Characterization and phylogenetic analysis of environmental stress-responsive SAP gene family encoding A20/AN1 zinc finger proteins in tomato / A. Solanke [et al.] // *Mol. Genet. Genomics*. – 2009. – Vol. 282, N 2. – P. 153–164. <https://doi.org/10.1007/s00438-009-0455-5>

## References

1. Dixit V. M., Green S., Sarma V., Holzman L. B., Wolf F. W., O'Rourke K., Ward P. A., Prochownik E. V., Marks R. M., Tumor necrosis factor-alpha induction of novel gene products in human endothelial cells including a macrophage-specific chemotaxin. *Journal of Biological Chemistry*, 1990, vol. 265, no. 5, pp. 2973–2978.
2. Opirari A. W., Jr., Boguski M. S., Dixit V. M. The A20 cDNA induced by tumor necrosis factor alpha encodes a novel type of zinc finger protein. *Journal of Biological Chemistry*, 1990, vol. 265, no. 25, pp. 14705–14708.
3. Rebagliati M. R., Weeks D. L., Harvey R. P., Melton D. A. Identification and cloning of localized maternal RNAs from *Xenopus* eggs. *Cell*, 1985, vol. 42, no. 3, pp. 769–777. [https://doi.org/10.1016/0092-8674\(85\)90273-9](https://doi.org/10.1016/0092-8674(85)90273-9)
4. Huang J., Teng L., Li L., Liu T., Li L., Chen D., Xu L.-G., Zhai Z., Shu H.-B. ZNF216 Is an A20-like and IκB Kinase γ-Interacting Inhibitor of NFκB Activation. *Journal of Biological Chemistry*, 2004, vol. 279, no. 16, pp. 16847–16853. <https://doi.org/10.1074/jbc.m309491200>
5. Mukhopadhyay A., Vij S., Tyagi A. K. Overexpression of a zinc-finger protein gene from rice confers tolerance to cold, dehydration, and salt stress in transgenic tobacco. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, vol. 101, no. 16, pp. 6309–6314. <https://doi.org/10.1073/pnas.0401572101>
6. Stroher E., Wang X. J., Roloff N., Klein P., Husemann A., Dietz K. J. Redox-dependent regulation of the stress-induced zinc-finger protein SAP12 in *Arabidopsis thaliana*. *Molecular Plant*, 2009, vol. 2, no. 2, pp. 357–367. <https://doi.org/10.1093/mp/ssn084>
7. Zhang Y., Lan H., Shao Q., Wang R., Chen H., Tang H., Zhang H., Huang J. An A20/AN1-type zinc finger protein modulates gibberellins and abscisic acid contents and increases sensitivity to abiotic stress in rice (*Oryza sativa*). *Journal of Experimental Botany*, 2016, vol. 67, no. 1, pp. 315–326. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv464>
8. Tyagi H., Jha S., Sharma M., Giri J., Tyagi A. K. Rice SAPs are responsive to multiple biotic stresses and overexpression of OsSAP1, an A20/AN1 zinc-finger protein, enhances the basal resistance against pathogen infection in tobacco. *Plant Science*, 2014, vol. 225, pp. 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.05.016>
9. Vij S., Tyagi A. K., Genome-wide analysis of the stress associated protein (SAP) gene family containing A20/AN1 zinc-finger(s) in rice and their phylogenetic relationship with *Arabidopsis*. *Molecular Genetics and Genomics*, 2006, vol. 276, no. 6, pp. 565–575. <https://doi.org/10.1007/s00438-006-0165-1>
10. Gao W., Long L., Tian X., Jin J., Liu H., Zhang H., Xu F., Song C. Genome-wide identification and expression analysis of stress-associated proteins (SAPs) containing A20/AN1 zinc finger in cotton. *Molecular Genetics and Genomics*, 2016, vol. 291, no. 6, pp. 2199–2213. <https://doi.org/10.1007/s00438-016-1252-6>
11. Gonzalez D. H., ed. *Plant Transcription Factors*. Boston, Academic Press, 2016. 422 p. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-19051-4>
12. Wegner M. All purpose Sox: The many roles of Sox proteins in gene expression. *International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 2010, vol. 42, no. 3, pp. 381–390. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2009.07.006>
13. Solanke A., Sharma M., Tyagi A. K., Sharma A. Characterization and phylogenetic analysis of environmental stress-responsive SAP gene family encoding A20/AN1 zinc finger proteins in tomato. *Molecular Genetics and Genomics*, 2009, vol. 282, no. 2, pp. 153–164. <https://doi.org/10.1007/s00438-009-0455-5>

## Информация об авторах

Кузмицкая Полина Викторовна – науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: P.Kuzmitskaya@igc.by.

Урбанович Оксана Юрьевна – д-р биол. наук, заведующая лабораторией. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: O.Urbanovic@igc.by.

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

## Information about the authors

Kuzmitskaya Polina Viktorovna – Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: P.Kuzmitskaya@igc.by.

Urbanovich Oksana Yur'evna – D. Sc. (Biology), 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: O.Urbanovic@igc.by.

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

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

**МЕДИЦИНА**  
**MEDICINE**

УДК 616.311.2-007.41-08:602.9-092.4-036.8517.955:519.622  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-463-472>

Поступило в редакцию 18.07.2018  
Received 18.07.2018

**С. П. Рубникович<sup>1</sup>, академик И. Д. Волотовский<sup>2</sup>, Ю. Л. Денисова<sup>3</sup>, Т. Э. Владимирская<sup>1</sup>,  
В. А. Андреева<sup>1</sup>, Г. Ю. Панасенкова<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>Институт биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь

**ПРИМЕНЕНИЕ КЛЕТОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ ТКАНЕЙ ПЕРИОДОНТА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

**Аннотация.** Перспективным направлением современных научных исследований является применение аутологичных и аллогенных мезенхимальных стволовых клеток для регенерации тканей периодонта. Целью исследования являлось изучение характера морфологических изменений в тканях патологически измененного периодонта при использовании биотрансплантата на основе мезенхимальных стволовых клеток жировой ткани, иммобилизованных на коллагеновом носителе в эксперименте на животных. Для эксперимента в качестве модели использовали рандомбредных самок белых крыс в количестве 60 особей, у которых производили забор жировой ткани для получения аллогенных мезенхимальных стволовых клеток. Все животные были разделены на 5 групп в зависимости от планируемого метода лечения – по 10 крыс в каждой. Контрольную группу составили 10 лабораторных животных со здоровой десной. Создание модели экспериментальной рецессии десны осуществляли путем механического иссечения тканей периодонта V-образной формы. Биопластический коллагеновый материал «Коллост» гель 7 % в изолированном виде обуславливает интенсификацию фиброза и служит «матриксом» для формирования фиброзной ткани, обеспечивает адгезию стволовых клеток и их трансформацию в про- и фибробласты. Инъекция суспензии клеточного трансплантата в физиологическом растворе активирует процессы клеточной пролиферации и трансформации клеток фибробластного дифферона. Суспензия клеточного трансплантата на стерильном биопластическом коллагеновом материале «Коллост» гель 7 % усиливает эффекты геля и стволовых клеток, способствует нивелированию атрофических и дистрофических изменений десны, усилению механической компоненты, уменьшению рецессии десны и глубины десневого кармана.

**Ключевые слова:** мезенхимальные стволовые клетки, рецессия десны, биопластический коллагеновый материал

**Для цитирования.** Применение клеточных технологий для регенерации тканей периодонта в эксперименте / С. П. Рубникович [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 463–472. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-463-472>

**Sergei P. Rubnikovich<sup>1</sup>, Academician Igor D. Volotovskiy<sup>2</sup>, Yulia L. Denisova<sup>3</sup>, Tatiana E. Vladimirskaia<sup>1</sup>,  
Vasilina A. Andreeva<sup>1</sup>, Galina Yu. Panasenkova<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>Institute Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>3</sup>Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus

**APPLICATION OF CELLULAR TECHNOLOGIES  
FOR REGENERATION OF PERIODONTAL TISSUES IN EXPERIMENT**

**Abstract.** A promising scope of modern scientific research is the use of autologous and allogeneic mesenchymal stem cells for regeneration of periodontal tissues. The aim of the study was to evaluate the nature of morphological changes in the pathologically altered periodontal tissues after injection of a biotransplant containing mesenchymal stem cells of the adipose tissue immobilized on a collagen carrier in an animal experiment. In the experiment, 60 randombred females of white rats were used as a model, whose adipose tissue was taken to obtain allogeneic mesenchymal stem cells. All animals were divided into 5 groups, depending on the planned method of treatment – 10 rats each. The control group consisted of 10 laboratory animals with healthy gingiva. The experimental gingival recession model was created by the V-shaped excision of periodontal tissues. The bioplastic collagen material “Collost” gel 7 % in isolated form determines the fibrosis intensification and serves as a “matrix” for the formation of a fibrous tissue, ensures the adhesion of stem cells and their transformation into pro- and fibroblasts. Injection of a cell transplant suspension into physiological saline activates the processes of cell proliferation and transformation of fibroblast dif-

ferentiating cells. Suspension of the cell transplant on a sterile bioplastic collagen material “Collost” gel 7 % enhances the effects of gel and stem cells, promotes the leveling of atrophic and dystrophic changes in the gum, strengthening a mechanical component, reducing the recession of the gum and the depth of the gingival pocket.

**Keywords:** mesenchymal stem cells, gum recession, bioplastic collagen material

**For citation:** Rubnikov S. P., Volotovskiy I. D., Denisova Yu. L., Vladimirovskaya T. E., Andreeva V. A., Panasenkov G. Yu. Application of cellular technologies for regeneration of periodontal tissues in experiment. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 463–472 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-463-472>

**Введение.** Рецессия десны является одной из распространенных форм патологии пародонта. По последним данным белорусских исследователей, рецессия десны выявлена во всех возрастных группах и регистрируется от 9,7 % у 15-летних пациентов и до 99,3 % – у взрослых [1].

Проблема повышения эффективности лечения рецессии десны остается актуальной из-за сложных полиэтиологических и патогенетических механизмов, приводящих к миграции десны вдоль корня зуба, которую наблюдают при анатомо-топографических особенностях зубочелюстной системы, воспалительно-деструктивном процессе в тканях пародонта, механической травме, ортодонтических мероприятиях, химических и физических повреждениях, а также вследствие возрастных изменений. С одной стороны, это обусловлено по-прежнему высокой распространенностью данного заболевания у населения, в том числе у лиц молодого возраста, а также все еще недостаточной эффективностью предлагаемых современных средств и методов лечения. В настоящее время существуют различные методы лечения рецессии десны с использованием комплекса терапевтических, хирургических, ортодонтических и ортопедических мероприятий, однако результаты наблюдений не указывают на долгосрочное восстановление тканей пародонта [1; 2].

Перспективным направлением современных научных исследований является применение аутологичных и аллогенных мезенхимальных стволовых клеток (МСК) для регенерации тканей пародонта, разработка новых методов восстановительной терапии и внедрение их в клиническую стоматологию, что позволит повысить эффективность лечения болезней пародонта и улучшить качество жизни пациентов [3–8].

В этом направлении специалистами многих стран проводятся разноплановые исследования, успех которых в значительной степени зависит от создания экспериментальной модели [9–15].

Таким образом, вышеизложенное указывает на целесообразность проведения аргументированных экспериментально-клинических исследований по применению в стоматологии мезенхимальных стволовых клеток, направленных на активацию процессов восстановления в тканях пародонта и позволяющих повысить эффективность лечения пациентов с рецессией десны.

Цель исследования – изучить характер морфологических изменений в тканях патологически измененного пародонта при использовании биотрансплантата на основе мезенхимальных стволовых клеток жировой ткани, иммобилизованных на коллагеновом носителе в эксперименте на животных.

**Материалы и методы исследования.** Экспериментальное исследование проводилось на базе Белорусской медицинской академии последипломного образования. Оперативное вмешательство выполняли на верхней и нижней челюстях крыс в области резцов.

Для эксперимента в качестве модели использовали нелинейных, рандомбредных, беспородных самок белых крыс в количестве 60 особей. Масса тела животных составила 200,0–250,0 г. Крысы в виварии содержались в стационарных условиях в соответствии с санитарно-гигиеническими характеристиками, утвержденными в Республике Беларусь.

Создание модели экспериментальной рецессии десны у животных проводили после предварительной анестезии (обезболивания достигали внутримышечным введением наркотических веществ (фентанил 0,005 % + дроперидол 0,25 % в соотношении 1 : 2) в дозе 0,3 мл на 100 г массы тела животного) с вестибулярной поверхности в области резцов на верхней и нижней челюстях справа, а также в области зубодесневого сосочка на верхней и нижней челюстях.

Оперативные вмешательства осуществляли путем механического иссечения тканей пародонта V-образной формы с вестибулярной поверхности твердосплавным шаровидным бором с использованием портативного микромотора. Зубодесневой сосочек между резцами иссекался вначале твердосплавным шаровидным бором, а затем скальпелем с целью формирования «черных треугольников».

До начала проведения экспериментальных исследований у особи в стерильных условиях производили забор жировой ткани в объеме равном 1–2 мл для получения аллогенных мезенхимальных стволовых клеток. Выделение и культивирование МСК, а также создание трансплантатов проводили в лабораторных условиях на базе Института биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси.

На втором этапе исследований на 10-е сутки после создания экспериментальной рецессии десны и завершения процесса эпителизации, лабораторные животные были распределены на следующие группы исследования в соответствии с проводимой терапией:

Контрольная группа (10 интактных крыс) со здоровой десной;

1-я группа (10 крыс) – сформирована рецессия десны, лечение отсутствовало;

2-я группа (10 крыс) – сформирована рецессия десны и проведены инъекции физиологического раствора в ткани десны;

3-я группа (10 крыс) – сформирована рецессия десны, проведены инъекции стерильного биопластического коллагенового материала Коллост®-гель в ткани десны;

4-я группа (10 крыс) – сформирована рецессия десны, проведены инъекции суспензии МСК ЖТ в физиологическом растворе в ткани десны;

5-я группа (10 крыс) – сформирована рецессия десны, проведены инъекции суспензии МСК ЖТ в стерильном биопластическом коллагеновом материале Коллост®-гель в ткани десны.

Животных выводили из эксперимента по 5 особей из каждой группы через 24 и 38 дней от момента формирования рецессии десны (14 и 28 дней после вмешательства) с соблюдением принципов биоэтики (в соответствии со стандартами GLP) на фоне внутривенного тиопенталового наркоза из расчета 1 мл 5 %-ного тиопентала натрия на 100 г веса животного. Проводился забор биоптата тканей комплекса «зуб–ткани периодонта–костная ткань» с целью проведения патоморфологических исследований.

В ходе эксперимента изучали челюстно-зубо-десневой блок верхней и нижней челюстей крыс. Из парафиновых блоков изготавливали срезы толщиной 3–5 мкм, которые окрашивали гематоксилином и эозином, по Массону. Изучение микропрепаратов и изготовление микрофотографий проводили с помощью микроскопов Axio Imager (Zeiss) и DMLS с программным обеспечением (Leica, Германия).

**Результаты и их обсуждение.** *Морфологическая картина тканей верхней и нижней челюсти интактных крыс соответствует гистологической норме:* десневой карман умеренной глубины или короткий, без содержимого в просвете. Свободная часть десны из многослойного плоского эпителия (МПЭ), эпителий прикрепления представлен фиброзной тканью и эпителиоидными клеками.

*На 14-е сутки в группе I* на верхней челюсти десневой карман глубокий. Свободная часть десны: эпителий многослойный плоский, ороговевающий с неравномерно узкой полоской рогового слоя. Собственная пластинка (СП) десны – плотная неоформленная волокнистая ткань, малоклеточная, без признаков воспалительной инфильтрации. Малочисленные частично спавшиеся кровеносные и лимфатические капилляры без клеточных компонентов в просвете. Эпителий прикрепления представлен узкой полоской уплощенных эпителиальных клеток. Дно десневого кармана умеренно расширено, и отмечается очаговая пролиферация эпителия. Перифокальный отдел периодонта – умеренная фиброплазия с умеренным серозно-продуктивным воспалением с переходом на периодонтальную связку и интегрированный с ней периост альвеолярного отростка челюсти (рис. 1, а).

На нижней челюсти десневая борозда умеренно глубокая, десневой канал слегка расширен. Эпителий свободной части десны многослойный плоский ороговевающий с неравномерно узкой полоской рогового слоя, с короткими широкими или узкими эпителиальными гребешками в наружной части десны. Дистальная часть десневого канала умеренно расширена. Эпителий прикрепления оторван, представлен узким тяжем уплощенных эпителиальных клеток. СП десны: рыхлая волокнистая ткань без воспалительной инфильтрации, с умеренно полнокровными капиллярами. В одном образце – выраженное серозно-гнойное воспаление с формированием микроабсцесса в прикорневой части зуба с переходом на периост альвеолярного отростка челюсти (рис. 1, б).

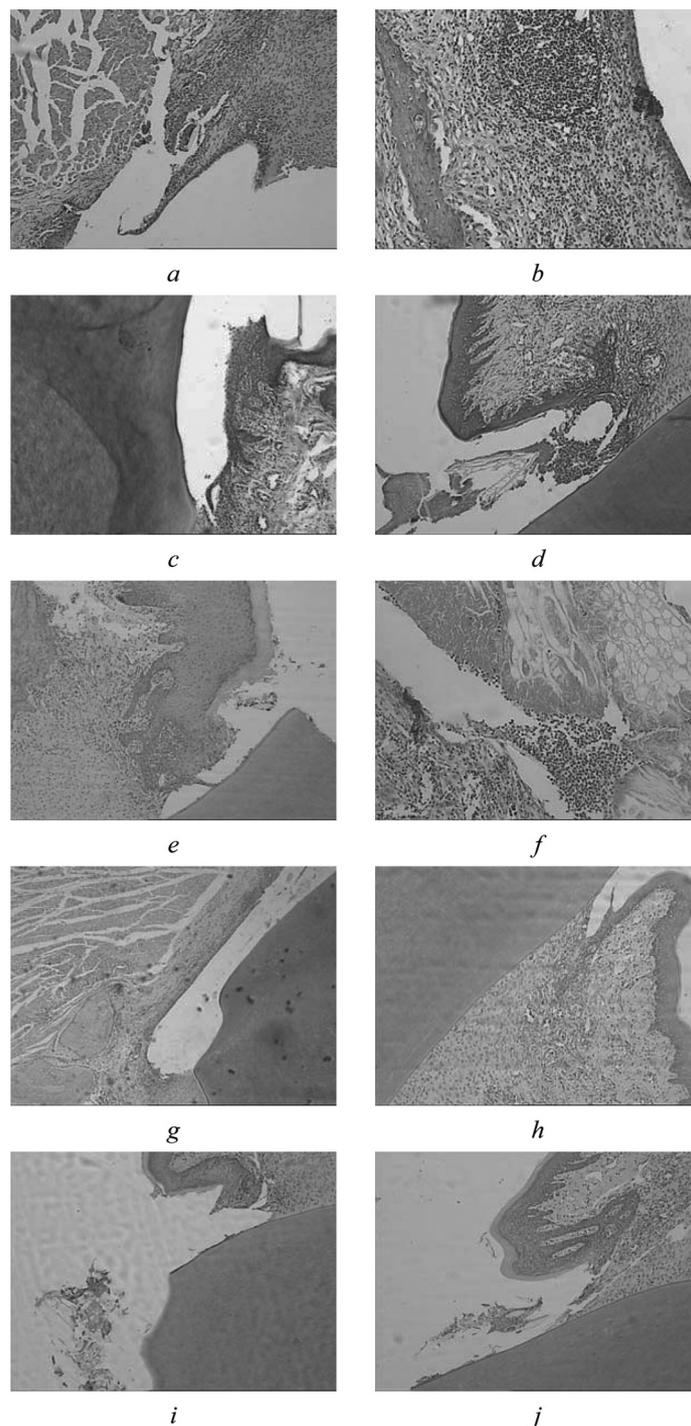


Рис. 1. Морфологические изменения в тканях на 14-е сутки: *a* – группа I, верхняя челюсть; *b* – группа I, нижняя челюсть; *c* – группа II, верхняя челюсть; *d* – группа II, нижняя челюсть; *e* – группа III, верхняя челюсть; *f* – группа III, нижняя челюсть; *g* – группа IV, верхняя челюсть; *h* – группа IV, нижняя челюсть; *i* – группа V, верхняя челюсть; *j* – группа V, нижняя челюсть

Fig. 1. Morphological changes in tissues on the 14<sup>th</sup> day: *a* – group I, upper jaw; *b* – group I, lower jaw; *c* – group II, upper jaw; *d* – group II, lower jaw; *e* – group III, upper jaw; *f* – group III, lower jaw; *g* – group IV, upper jaw; *h* – group IV, lower jaw; *i* – group V, upper jaw; *j* – group V, lower jaw

На 14-е сутки в группе II на верхней челюсти десневая борозда глубокая, десневой канал узкий (рис. 1, *c*). Эпителий свободной части десны МП, ороговевающий с набухшим и сегментарно отслоенным роговым слоем. В дистальной части и у дна – мелкие очаги отека и разрыхления эпителия с гидропической дистрофией клеток. СП десны – малоклеточная волокнистая ткань

с умеренным отеком, набуханием и разрыхлением коллагеновых волокон (КВ). В одном случае – с минимальным серозным воспалением. Отек и разрыхление проксимального сегмента периодонтальной связки.

На нижней челюсти десневая борозда умеренной глубины. Дно десневого канала из узкого сегмента рыхлой волокнистой ткани с минимальным серозным воспалением (рис. 1, *d*). Эпителий прикрепления оторван с узким тяжем уплощенного эпителия и перифокально в зоне дна с серозно-продуктивным воспалением. СП свободной части десны из малоклеточной рыхлой волокнистой ткани с набухшими КВ и расширенными лимфатическими капиллярами, очаговым серозно-продуктивным воспалением в дистальном отделе и внутренней части.

На 14-е сутки в группе III на верхней челюсти десневая борозда неглубокая, десневой канал умеренно расширен, в его просвете геля нет. Встречаются небольшие пласты воспалительного экссудата – эритроциты, рыхлый фибрин, единичные макрофаги, редко разбросанные мононуклеары, включая лимфоциты и сегменто-ядерные лейкоциты (СЯЛ) (рис. 1, *e*). Дно десневого канала: очаговая пролиферация эпителиоидных клеток с эктазией и полнокровием капилляров и венул в прилежащей СП десны. СП свободной части десны: малоклеточная волокнистая ткань с набухшими и гомогенизированными КВ, эктазией и полнокровием капилляров и венул. Эпителий прикрепления оторван, с узким тяжем эпителиальных клеток.

На нижней челюсти десневая борозда расширена, десневой канал глубокий. В просвете последнего: небольшие тяжи геля с очагами разрежения и диффузно-очаговой пенетрацией гнойным воспалительным экссудатом (рис. 1, *f*). СП свободной части десны: рыхлая неоформленная волокнистая ткань, отечная, с умеренно и сильно выраженной эктазией и полнокровием капилляров и венул и диффузным серозно-продуктивным воспалением, слабо и умеренно выраженным, в большей степени – на уровне дна десневого канала. Эпителий прикрепления оторван, представлен узким тяжем рыхлой волокнистой ткани с перифокальной узловой гиперплазией эпителиоидных клеток с мелким очагом начинающейся фиброплазии. Периодонтальная связка: неравномерно широкая, из густоклеточной волокнистой ткани с микроабсцессом.

На 14-е сутки в группе IV на верхней челюсти десневая борозда широкая, десневой канал глубокий. В просвете мелкий сегмент детрита и фибрина с организацией и фрагментацией последнего (рис. 1, *g*). Прикрепленная часть оторвана и в виде тяжа эпителиоидных клеток с гиперплазией их в дистальной части и более выраженной в области дна с перифокальной фиброплазией СП десны, с многочисленными профибробластами, с распространением на периодонтальную связку и периост альвеолярного отростка челюсти. Периодонтальная связка густоклеточная. Очаговый фиброз периоста. Свободная часть десны из ороговевающего МПЭ с сегментарно слоенным и/или отслоенным роговым слоем. Очаги неангиогенеза – мелкие группы и цепочки эктазированных полнокровных капилляров. Без признаков воспаления.

На нижней челюсти десневая борозда относительно широкая, десневой канал глубокий, без содержимого (рис. 1, *h*). Дно канала из узкой полоски рыхлой волокнистой ткани с единичными капиллярами и сегментарно – из проксимальной части периодонтальной связки. Последняя гиперклеточная, дистальная ее часть расширена и интегрирована с периостом альвеолярного отростка челюсти. Свободная часть десны из МПЭ с обычными или сглаженными эпителиальными гребешками. СП последней из зрелой рыхлой СТ с малочисленными полнокровными капиллярами и участком в дистальном отделе и у дна десневого кармана умеренно клеточной ткани с преобладанием мелких недифференцированных клеток, без признаков воспаления.

На 14-е сутки в группе V на верхней челюсти десневой канал обычный или короткий, в просвете содержимого нет или встречаются единичные мелкие глыбчатые фрагменты геля с мелкоочаговым просветлением и крошечным участком фиброза и склероза (рис. 1, *i*). Дно десневого канала расширено, представлено эпителиальными клетками и дистально расположенной узкой полоской зрелой малоклеточной СТ (преимущественно фиброциты). СП свободной части десны из рыхлой волокнистой ткани, малоклеточной, с мелкими очагами узких капилляров без компонентов крови в их просвете, и без признаков воспаления. Эпителий прикрепления представлен узким тяжем мелких недифференцированных клеток – предшественников фибробластов и перифокальной относительно широкой полосой эпителиальных клеток. Периодонтальная связка широкая малоклеточная, интегрирована с периостом альвеолярного отростка челюсти.

На нижней челюсти десневой канал короткий, в просвете глыбчатый гель: разрыхленный и сегментарно фрагментированный (рис. 1, *ж*).

Дно десневого канала из узкого тяжа рыхлой мелкоячеистой волокнистой ткани и в дистальной части – из полосы эпителиальных клеток. Эпителий прикрепления полиморфной гистоструктуры: мелкий участок эпителиоидных клеток с гомогенным межклеточным веществом у дна десневого канала, проксимальный участок из рыхлой малоклеточной волокнистой ткани, очаги тонкостенных эктазированных сосудов с пролиферацией и десквамацией эндотелиоцитов, диффузно расположенные мелкие недифференцированные клетки.

На 28-е сутки в группе I на верхней челюсти десневая борозда углублена и формирует десневой «карман» (рис. 2, *а*). Эпителий прикрепления представлен неравномерно узкой полоской. МПЭ с очаговым разрыхлением у дна десневого кармана; оторвана (механическое повреждение) от корня зуба. СП десны – из рыхлой волокнистой ткани, малоклеточной (фиброциты, редко – фибробласты, диффузно разбросанные лимфоциты и плазматические клетки), с эктазией лимфатических капилляров. Периодонтальная связка неравномерно широкая, умеренно клеточная, интегрирована с надкостницей альвеолярного отростка челюсти с везикуляцией остеоцитов и набуханием межклеточного основного вещества.

На нижней челюсти десневая борозда углублена и несколько расширена, без содержимого. Очагово в субэпителиальной зоне – набухание фибробластов и инфильтрация эозинофильными лейкоцитами. Свободный край десны из МПЭ, ороговевающего, в одном случае в состоянии субтотального отека и гидропического некроза клеток эпителия с микроабсцессом в эпителии (рис. 2, *б*). Эпителий прикрепления оторван, представлен узким тяжем волокнистой ткани. СП десны представлена малоклеточной волокнистой тканью, в одном случае с инфильтрацией СЯЛ. Периодонтальная связка густоклеточная, интегрирована с надкостницей альвеолярного отростка челюсти.

На 28-е сутки в группе II на верхней челюсти десневая борозда углублена (рис. 2, *с*). Отмечается набухание и бледность клеток эпителия, в большей степени – шиповатого слоя и минимальная пролиферация клеток базального слоя. Эпителий прикрепления отслоен (оторван) от корня зуба, представлен чрезмерно узкой полоской отечной СТ с малочисленными фибробластами и единичными лимфоцитами. СП десны из малоклеточной волокнистой ткани, в состоянии сильно выраженного отека с фрагментацией набуханием и элиминацией КВ. Периодонтальная связка густоклеточная, с набухшими бледно окрашенными фибробластами; интегрирована с надкостницей альвеолярного отростка челюсти.

На нижней челюсти десневая борозда углублена и формирует расширенный десневой карман (рис. 2, *д*). В просвете десневого кармана – сегменты волосяных стержней и относительно обширный участок воспалительного «экссудата» из мононуклеаров, включая СЯЛ, который распространяется на дно десневого кармана и достигает проксимального сегмента периодонтальной связки.

Последняя отечная, с набухшими бледно окрашенными фибробластами, интегрирована с отечной надкостницей альвеолярного отростка челюсти.

На 28-е сутки в группе III на верхней челюсти десневая борозда углублена, формирует десневой карман, в основном без содержимого (рис. 2, *е*). В проксимальной части – мелкие глыбки геля и сегмент уплотненной «слизи» с адгезией лимфоцитов. Очаговая слабо выраженная гиперплазия клеток базального слоя с везикуляцией многих клеток. Эпителий прикрепления отслоен от края зубного корня. СП десны из малоклеточной волокнистой ткани, с малочисленными мелкими тонкостенными капиллярами. Периодонтальная связка густоклеточная с очаговым утолщением и склерозом. Интегрирована с надкостницей альвеолярного отростка челюсти с гомогенным межклеточным костным матриксом, очаговой элиминацией или везикуляцией остеоцитов.

На нижней челюсти десневая борозда углублена и очагово расширена (рис. 2, *ф*). В десневом кармане и в ткани десны – полиморфные глыбки геля, сегментарно с цепочкой лимфоцитов по краю отдельных глыбок. Свободная часть десны из МПЭ, отмечается набухание и гомогенизация шиповатых клеток, очагово – везикуляция; очаговая пролиферация, набухание и бледность окраски базальных клеток, тонкие и тупоконечные эпителиальные гребешки.

Эпителий прикрепления оторван, представлен узкой полоской отечной волокнистой ткани с краевой адгезией мелких глыбок геля.

СП десны из густоклеточной волокнистой ткани. Периодонтальная связка густоклеточная, очагово утолщена с концентрической ориентацией фиброцитов; интегрирована с надкостницей альвеолярного отростка челюсти, с четкими линиями пластинок остеонов и везикуляцией остеоцитов.

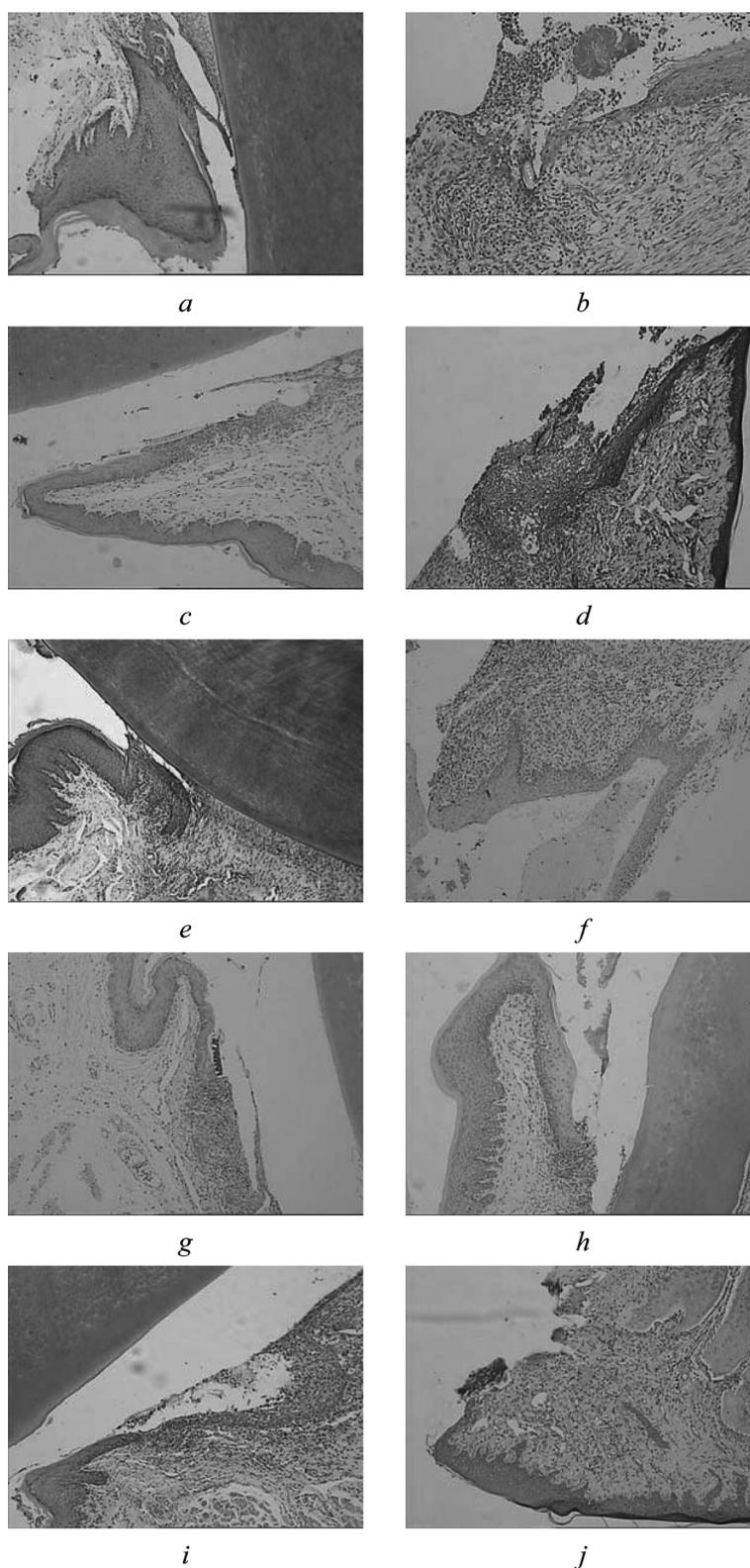


Рис. 2. Морфологические изменения в тканях на 28-е сутки: *a* – группа I, верхняя челюсть; *b* – группа I, нижняя челюсть; *c* – группа II, верхняя челюсть; *d* – группа II, нижняя челюсть; *e* – группа III, верхняя челюсть; *f* – группа III, нижняя челюсть; *g* – группа IV, верхняя челюсть; *h* – группа IV, нижняя челюсть; *i* – группа V, верхняя челюсть; *j* – группа V, нижняя челюсть

Fig. 2. Morphological changes in tissues on the 28<sup>th</sup> day: *a* – group I, upper jaw; *b* – group I, lower jaw; *c* – group II, upper jaw; *d* – group II, lower jaw; *e* – group III, upper jaw; *f* – group III, lower jaw; *g* – group IV, upper jaw; *h* – group IV, lower jaw; *i* – group V, upper jaw; *j* – group V, lower jaw

На 28-е сутки в группе IV на верхней челюсти десневая борозда углублена, десневой карман узкий и без содержимого (рис. 2, g). Свободная часть десны из МПЭ, отек и набухание межклеточного матрикса и клеток слоев эпителия с их дисконкомплексацией. Эпителий прикрепления отслоен, представлен относительно широким матриксом и набухшим и также бледно окрашенными фибробластами и эпителиоидными клетками с примесью слоев густоклеточной волокнистой ткани. СП десны из малоклеточной волокнистой ткани, сильно отекающей, с набуханием клеток и волокнистых структур, диффузно очаговой их элиминацией и умеренно выраженным неангиогенезом.

Периодонтальная связка неравномерно утолщена, густоклеточная, умеренно отекающая, с набухшими фибробластами и мелкими недифференцированными клетками.

На нижней челюсти десневая борозда глубокая с «объемным» десневым карманом (рис. 2, h). Эпителий прикрепления представлен тяжем эпителиоидных клеток с формирующимися эпителиальными гребешками. СП десны из умеренно и слабо клеточной волокнистой ткани, отекающей, с очагами элиминации клеток и единичными мелкими недифференцирующимися клетками. Периодонтальная связка неравномерно утолщена, отекающая, густоклеточная, с преобладанием фиброцитов, минимальным ангиогенезом отростка челюсти.

На 28-е сутки в группе V на верхней челюсти десневой карман широкий и мелкий. В просвете слез с пенетрацией лимфоцитами, СЯЛ и малочисленными мелкими недифференцированными клетками (рис. 2, i). Дно кармана из малоклеточной волокнистой ткани с малочисленными мелкими гиперхромными недифференцированными клетками и, преимущественно, с участком эпителиоидных клеток, формирующих эпителиоидные гребешки.

Гель в десневом канале и тканях периодонта не визуализируется. Эпителий прикрепления оторван, из узкого тяжа малоклеточной волокнистой ткани, с гомогенным межклеточным матриксом, единичными СЯЛ.

Периодонтальная связка неравномерно широкая, густоклеточная, интегрирована с надкостницей альвеолярного отростка челюсти нормального строения.

На нижней челюсти десневой карман умеренно расширен и мелкий, без содержимого. Свободная часть десны из МПЭ, ороговевающего, с тонким роговым и уплотненным зернистым слоем (рис. 2, j). СП десны из рыхлой густоклеточной волокнистой ткани. Умеренно выраженный неангиогенез. Периодонтальная связка чрезмерно широкая и густоклеточная, из фиброцитов, фибробластов и, преимущественно, эпителиоидных клеток, с малочисленными редуцирующими стволовыми клетками, интегрирована с надкостницей альвеолярного отростка челюсти нормального строения.

**Заключение.** На 14-е сутки эксперимента в группах I–III отмечаются сходные патоморфологические изменения: формирование широкого и глубокого десневого кармана, очаги серозно-продуктивного и серозно-гнояного воспаления, немногочисленные лимфатические и кровеносные капилляры, умеренный и выраженный стромальный отек, которые, в основном, сохраняются к 28-м суткам эксперимента. В IV и V группах животных очаги воспаления и выраженного отека не визуализируются, отмечается умеренная и выраженная фиброплазия с преимущественной пролиферацией фибробластов и участки неангиогенеза. На 28-е сутки в IV группе животных отмечается уменьшение глубины десневого кармана, выраженная пролиферация клеток фибробластного дифферона, сохраняются очаги слабого отека. В V группе наблюдается уменьшение рецессии десны, сохранение очагов фиброплазии и пролиферации эпителиоидных клеток, десневой карман умеренной глубины или короткий, что соответствует гистологической норме.

Местное введение физиологического раствора в ткани десны обуславливает отек и набухание тканевых и клеточных компонентов десны и периодонта, что нарушает их механическую и биофизиологическую функцию, способствует развитию дистрофических изменений (гидропическая дистрофия) и наслоению воспалительных процессов (периодонтита).

Биопластический коллагеновый материал «Коллост» гель 7 % в изолированном виде обуславливает интенсификацию фиброза, поскольку практически не рассасывается, служит «матриksom» для формирования фиброзной ткани, обеспечивает адгезию стволовых клеток и их трансформацию в про- и фибробласты.

Инъекция суспензии клеточного трансплантата в физиологическом растворе активизирует процессы клеточной пролиферации и трансформации клеток фибробластного дифферона.

Суспензия клеточного трансплантата на стерильном биопластическом коллагеновом материале «Коллост» гель 7 % усиливает эффекты геля и стволовых клеток, способствует нивелированию атрофических и дистрофических изменений десны, усилению механической компоненты, уменьшению рецессии десны и глубины десневого кармана.

Экспериментальные исследования выполнены в рамках отдельного проекта фундаментальных и прикладных исследований НАН Беларуси «Разработать биотрансплантат на основе мезенхимальных стволовых клеток жировой ткани, иммобилизованных на биodeградируемом носителе, для применения в лечении болезней пародонта» по заданию «Провести экспериментальные и клинические испытания биотрансплантата на основе мезенхимальных стволовых клеток жировой ткани, иммобилизованных на биodeградируемом носителе, для применения в лечении болезней пародонта» № 20164574, совместно с сотрудниками ГНУ «Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси».

### Список использованных источников

1. Распространенность болезней пародонта, кариеса корня зуба, чувствительности дентина и зубочелюстных деформаций в Республике Беларусь по результатам обследования населения в возрастных группах 35–44, 45–54 и 55–64 года / Л. Н. Дедова [и др.] // *Стоматолог*. – 2016. – № 1(20). – С. 6–53.
2. Дедова, Л. Н. Систематика заболеваний пародонта / Л. Н. Дедова // *Стоматологический журн.* – 2002. – № 2. – С. 2.
3. Использование стволовых клеток крови плода крысы при воспалительно-деструктивных процессах в тканях пародонта / В. В. Алямовский [и др.] // *Институт стоматологии*. – 2014. – № 1(62). – С. 103–105.
4. Комплексный подход к планированию лечения заболеваний пародонта фактором роста / А. И. Мусиенко [и др.] // *Стоматология Казахстана*. – 2014. – № 3(4). – С. 67–68.
5. Клинико-экспериментальное обоснование использования комбинированного клеточного трансплантата на основе мультипотентных мезенхимных стромальных клеток жировой ткани у пациентов с выраженным дефицитом костной ткани челюстей / И. С. Алексеева [и др.] // *Клеточная трансплантология и тканевая инженерия*. – 2012. – № 1. – С. 97–105.
6. Сравнительное исследование влияния фибробластов кожи и стромальных клеток костного мозга, заключенных в коллагеновый гель, на регенерацию десны / А. А. Бармашева [и др.] // *Пародонтология*. – 2012. – № 4. – С. 20–25.
7. Тканеинженерная конструкция на основе мультипотентных стромальных клеток жировой ткани и материала «Остеоматрикс» для регенерации костной ткани / Т. Б. Бухарова [и др.] // *Клеточные технологии в биологии и медицине*. – 2011. – № 3. – С. 167–173.
8. Перспективы использования стволовых клеток в терапии заболеваний тканей пародонта / Г. Г. Манашев [и др.] // *Сибирское медицинское обозрение*. – 2012. – № 4(76). – С. 3–6.
9. Рубникович, С. П. Костные трансплантаты и заменители для устранения дефектов и аугментации челюстных костей в имплантологии и пародонтологии / С. П. Рубникович, И. С. Хомич // *Стоматолог*. – 2014. – № 1(12). – С. 77–86.
10. Рубникович, С. П. Применение современных остеопластических материалов в хирургической стоматологии / С. П. Рубникович, И. С. Хомич // *Стоматолог*. – 2014. – № 4(15). – С. 56–57.
11. Направленная регенерация костных дефектов альвеолярного отростка с использованием стволовых клеток костного мозга на коллапановой подложке у экспериментальных животных / В. Ф. Куцевляк [и др.] // *Вестн. проблем биологии и медицины*. – 2015. – Т. 3, № 2. – С. 368–374.
12. Характеристика степени замещения пародонтальных дефектов разной топографии после аутотрансплантации васкулярно-стромальноклеточной фракции липоаспирата / М. Д. Перова [и др.] // *Кубанский науч. мед. вестн.* – 2013. – № 6(141). – С. 142–148.
13. Метод моделирования экспериментального периодонтита у животных / С. П. Рубникович [и др.] // *Мед. журн.* – 2011. – № 1(35). – С. 97–101.
14. Туманов, В. П. 30-летний опыт разработки и применения клеточных технологий в клинической практике / В. П. Туманов, Д. А. Жакота, Н. С. Корчагина // *Пластическая хирургия и косметология*. – 2012. – № 3. – С. 433–449.
15. Сысоева, В. Ю. Стволовые клетки в стоматологии / В. Ю. Сысоева, Ю. М. Тернова // *Современная стоматология*. – 2012. – № 2. – С. 28–30.

### References

1. Dedova L. N., Denisova Y. L., Kandrukevich O. V., Solomevich A. S., Rosenik N. I. The Prevalence of Periodontal Diseases, Root Caries, Dentine Sensitivity and Dentoalveolar Deformities in the Republic of Belarus Based on the Results of Examining the Population Aged 35–44, 45–54 and 55–64 Years. *Stomatolog = Stomatologist*, 2016, no. 1(20), pp. 6–53 (in Russian).
2. Dedova L. N. Systematics of periodontal disease. *Stomatologicheskii zhurnal [Dental journal]*, 2002, no. 2, pp. 2 (in Russian).
3. Alyamovskiy V. V., Shestakova L. A., Yarygin E. I., Shmidt P. A., Lazarenko L. I. Use of cord blood stem cells of rat's fetal in the inflammatory and destructive processes in periodontal tissues. *Institut stomatologii [The Dental Institute]*, 2014, no. 1(62), pp. 103–105 (in Russian).

4. Musienko A. I., Musienko S. I., Kushnir D. V., Musienko A. A. Complex approach to planning treatment of periodontal diseases by growth factor. *Stomatologiya Kazahstana [Stomatology of Kazakhstan]*, 2014, no. 3(4), pp. 67–68 (in Russian).
5. Alexeeva I. S., Volkov A. V., Kulakov A. A., Goldshtein D. V. Clinical and experimental study on the use of combined cell transplant on the basis of multipotent mesenchymal stromal cells of adipose tissue in patients with severe deficiency of jaws bone tissue. *Kletochnaya transplantologiya i tkanevaya inzheneriya [Cellular transplantology and tissue engineering]*, 2012, no. 1, pp. 97–105 (in Russian).
6. Barmasheva A. A., Nikolaenko N. S., Samusenko I. A., Orekhova L. Yu., Pinaev G. P. A comparative study of the effect of skin fibroblasts and bone marrow stromal cells encased in a collagen gel on gum regeneration. *Parodontologiya = Periodontology*, 2012, no. 4, pp. 20–25 (in Russian).
7. Buharova T. B., Arutjunjan I. V., Shustrov S. A., Alekseeva I. S., Fedjunina I. A., Logovskaja L. V., Volkov A. V., Rzhainova A. A., Grigor'jan A. S., Kulakov A. A., Gof'dshtejn D. V. Tissue-engineering design based on multipotent stromal cells of adipose tissue and “Osteomatrix” material for bone tissue regeneration. *Kletochnye tehnologii v biologii i medicine = Cell Technologies in Biology and Medicine*, 2011, no. 3, pp. 167–173 (in Russian).
8. Manashev G. G., Lazarenko L. I., Jarygin E. I., Mutaev Je. V., Bondar' V. S. Prospects for the use of stem cells in the treatment of periodontal disease. *Sibirskoe medicinskoe obozrenie = Siberian medical review*, 2012, no. 4(76), pp. 3–6 (in Russian).
9. Rubnikovich S. P., Khomich I. S. The use of bone grafts and bone substitutes to eliminate defects and augment jaw bones in dental implantology and periodontology. *Stomatolog = Stomatologist*, 2014, no. 1(12), pp. 77–86 (in Russian).
10. Rubnikovich S. P., Khomich I. S. The use of bone grafts and modern bone substitutes in oral surgery. *Stomatolog = Stomatologist*, 2014, no. 4(15), pp. 56–57 (in Russian).
11. Kucevljak V. F., Kucevljak V. I., Omel'chenko E. A., Abirnik A. S., Cyganova I. V. Directed regeneration of bone defects of the alveolar process using bone marrow stem cells on the collagen substrate in experimental animals. *Vestnik problem biologii i mediciny = Bulletin of problems in biology and medicine*, 2015, vol. 3, no. 2, pp. 368–374.
12. Perova M. D., Gajvoronskaya T. V., Karpjuk V. B., Tropina A. V. Replacement evaluation of different periodontal defects using stromal vascular fraction of lipoaspirate. *Kubanskii nauchnyi meditsinskii vestnik [Kuban Scientific Medical Bulletin]*, 2013, no. 6(141), pp. 142–148 (in Russian).
13. Rubnikovich S. P., Vladimirskaia T. Je., Shved I. A., Veyalkina N. N. Method for modeling experimental periodontitis in animals. *Medicinskii zhurnal = Medical Journal*, 2011, no. 1(35), pp. 97–101 (in Russian).
14. Tumanov V. P., Zhakota D. A., Korchagina N. S. 30year experience of development and application of cell technologies in clinical practice. *Plasticheskaya hirurgiya i kosmetologiya [Plastic surgery and cosmetology]*, 2012, no. 3, pp. 433–449 (in Russian).
15. Sysoeva V. Ju., Ternova Ju. V. Stem cells in dentistry. *Sovremennaya stomatologiya [Modern dentistry]*, 2012, no. 2, pp. 28–30 (in Russian).

### Информация об авторах

*Рубникович Сергей Петрович* – д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой. Белорусская медицинская академия последипломного образования (ул. П. Бровки, 3/3, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rubnikovichs@mail.ru.

*Волотовский Игорь Дмитриевич* – академик, д-р биол. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: volotovskii@yahoo.com.

*Денисова Юлия Леонидовна* – д-р мед. наук, профессор. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, Минск, Республика Беларусь). E-mail: denisova-yul@mail.ru.

*Владимирская Татьяна Эрнстовна* – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Белорусская медицинская академия последипломного образования (ул. П. Бровки, 3/3, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tan\_2304@inbox.ru.

*Андреева Василина Анатольевна* – канд. мед. наук, доцент. Белорусская медицинская академия последипломного образования (ул. П. Бровки, 3/3, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vasilinastomatolog@tut.by.

*Панасенкова Галина Юрьевна* – аспирант. Белорусская медицинская академия последипломного образования (ул. П. Бровки, 3/3, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: panasenkova3339@mail.ru.

### Information about the authors

*Rubnikovich Sergei Petrovich* – D. Sc. (Medicine), Professor, Head of the Department. Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education (3/3, P. Browka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rubnikovichs@mail.ru.

*Volotovskiy Igor Dmitrievich* – Academician, D. Sc. (Biology), Professor, Head of the Laboratory. Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volotovskii@yahoo.com.

*Denisova Yulia Leonidovna* – D. Sc. (Medicine), Professor. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhynskiy Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: denisova-yul@mail.ru.

*Vladimirskaia Tatiana Ernstovna* – Ph. D. (Biology), Leading researcher. Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education (3/3, P. Browka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tan\_2304@inbox.ru.

*Andreeva Vasilina Anatolievna* – Ph. D. (Medicine), Assistant Professor. Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education (3/3, P. Browka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vasilinastomatolog@tut.by.

*Panasenkova Galina Yurievna* – Postgraduate student. Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education (3/3, P. Browka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: panasenkova3339@mail.ru.

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

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ**  
**EARTH SCIENCES**

УДК 551.24(477+553.98)  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-473-479>

Поступило в редакцию 07.05.2018  
Received 07.05.2018

**Член-корреспондент Р. Е. Айзберг, Я. Г. Грибик**

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

**ОСОБЕННОСТИ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ И СИНРИФТОВОЙ ГЕОДИНАМИКИ ПРИПЯТСКОГО И ДНЕПРОВСКОГО СЕГМЕНТОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ**

**Аннотация.** Расшифровка сейсмической структуры земной коры и верхней мантии на основе глубинного сейсмического зондирования по программе «Георифт-2013» вдоль Припятского и Днепровского прогибов по профилю Несвиж–Брагин–Чернигов–Полтава позволяет развить представления о строении и герцинской синрифтовой геодинамике указанных сопредельных структур Припятско-Днепровско-Донецкого (ПДД) авлакогена. Установленное в нижней коре под Днепровским грабнем аномально мощное региональное высокоскоростное тело, которое интерпретируется как рифтовая подушка (rift pillow), является одним из показателей проявления активной плюм-тектоники в процессе герцинского рифтогенеза в данном сегменте ПДД авлакогена. В Припятском сегменте, отделенном от Днепровского эшелонированными глубинными структурами в зоне Брагинско-Лоевской седловины, строение коро-мантийной границы отличается по сравнению с Днепровским сегментом более низким уровнем залегания раздела Мохо, который отражается субгоризонтальным положением в поперечных сечениях этого палеорифта. Здесь не проявились активные плюм-тектонические события.

**Ключевые слова:** Припятский палеорифт, Днепровский палеорифт, механизм рифтогенеза, коро-мантийная граница, раздел Мохо, горизонт субМохо, рифтовая подушка, герцинская плюм-тектоника

**Для цитирования.** Айзберг, Р. Е. Особенности глубинного строения и синрифтовой геодинамики Припятского и Днепровского сегментов земной коры / Р. Е. Айзберг, Я. Г. Грибик // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 473–479. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-473-479>

**Corresponding Member Romma Ye. Aizberg, Yaroslav G. Gribik**

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

**FEATURES OF THE DEEP STRUCTURE AND SYNRIFFT GEODYNAMICS OF THE PRIPYAT AND DNIENR SEGMENTS OF THE EARTH CRUST**

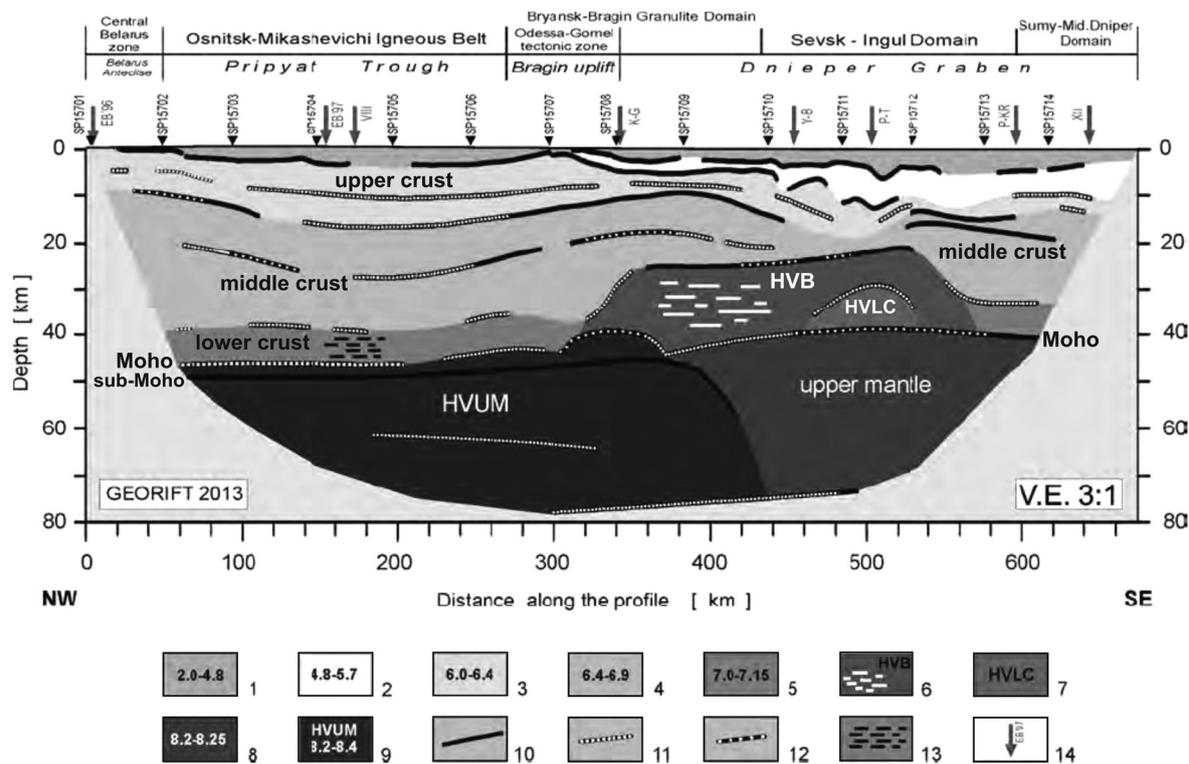
**Abstract.** Decoding the seismic-velocity structure of the earth crust and the upper mantle on the basis of deep seismic sounding according to the Georift-2013 program along the Pripyat and Dnieper troughs along the Nesvizh-Bragin-Chernigov-Poltava profile allows one to develop the ideas about the structure and Hercynian synriftic geodynamics of the contiguous adjacent structures of the Pripyat-Dnieper-Donets aulacogene. The abnormally powerful regional high-speed body, which is interpreted as a rift pillow, established in the lower crust under the Dnieper graben, is one of the indicators of manifestation of active plume tectonics in the process of Hercynian rifting in this segment of the aulacogen PDD. In the Pripyat segment, separated from the Dnieper segment by echeloned deep structures in the zone of the Bragin-Loevsky saddle, the structure of the crust-mantle boundary differs in comparison with the Dnieper segment by a lower level of the Moho surface; it is subhorizontal in the cross sections of the Pripyat paleorift. There were no active plume-tectonic events in scale.

**Keywords:** Pripyat paleorift, Dnieper paleorift, riftogenesis mechanism, crust-mantle boundary, Moho surface, subMoho horizon, rift pillow, Hercynian plum-tectonics

**For citation:** Aizberg R. Ye., Gribik Ya. G. Features of the deep structure and synrift geodynamics of the Pripyat and Dniepr segments of the earth crust. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 473–479 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-473-479>

Сейсмическая модель земной коры вдоль Припятского и Днепровского палеорифтов, разработанная интернациональной группой геофизиков и геологов (включая авторов настоящей статьи) по трассе субширотного глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) Несвиж–Брагин–Чернигов–Полтава в соответствии с программой «Георифт-2013» [1], позволяет развить представления о строении и герцинской синрифтовой геодинамике указанных сопредельных структур Припятско-Днепровско-Донецкого (далее – ПДД) авлакогена и подстилающих их слоев консолидированной коры и коро-мантийной границы.

Особенности глубинной структуры коро-мантийной границы отражены на упрощенной модели (рисунок) по субширотному геотраверсу Георифт-2013 (ГР-13) [1] и на поперечных сейсмическими разрезах Припятского и Днепровского прогибов [2–4]. На профиле ГР-13 Несвиж–Полтава основной контрастный раздел в пределах коро-мантийной границы Припятско-Брагинского ареала представлен поверхностью Мохо, разделяющей нижнюю кору с  $V_p = 7,10$  км/с, и подстилающий верхнемантийный слой с определяемой под Брагинско-Лоевской седловиной  $V_p = 8,25$  км/с. Уровень залегания поверхности Мохо изменяется в направлении от северо-западной границы Припятского прогиба до Брагинско-Лоевской седловины от ~46 до ~43 км. На отрезке пикетов (ПК) 305–320 км, соответствующем седловине, поверхность Мохо характеризуется высокоамплитудным (~4,5 км) подъемом до отметок ~40 км, который образует западное крыло Черниговской антиформы типа антиклинорного выступа (ПК 305–370 км). На кривой рас-



Упрощенная модель структуры литосферы вдоль профиля ГСЗ Георифт-2013 [1]: 1 – осадочный чехол ( $V_p = 2,0–4,8$  км/с); 2 – плотные породы ( $V_p = 4,8–5,7$  км/с); 3 – кристаллическая верхняя кора (6,0–6,4 км/с); 4 – средняя кора (6,4–6,9 км/с); 5 – нижняя кора (7,0–7,1 км/с); 6 – высокоскоростное тело; 7 – высокоскоростное тело в верхней коре; 8 – верхняя мантия (8,2–8,25 км/с); 9 – высокоскоростная верхняя мантия (8,2–8,4 км/с); 10–12 – фрагменты основных преломленных и отраженных границ (соответственно) на основе интерпретации Р-волн; 13 – зоны высокой отражаемости в нижней коре по данным метода общей глубинной точки (ОГТ) на профиле VIII [3]; 14 – пункты пересечения с другими профилями. Пункты взрыва и определения местоположения

Simplified model of the lithospheric structure derived along the Georift-2013 profile [1]: 1 – sedimentary cover ( $V_p = 2.0–4.8$  km/s); 2 – compacted sediments ( $V_p = 4.8–5.7$  km/s); 3 – crystalline uppermost crust (6.0–6.4 km/s); 4 – middle crust (6.4–6.9 km/s); 5 – lower crust (7.0–7.1 km/s); 6 – high-velocity body; 7 – high-velocity lower crust; 8 – upper mantle (8.2–8.25 km/s); 9 – high velocity upper mantle (8.2–8.4 km/s); 10–12 – fragments of major boundaries interpreted from P-wave refractions, refractions and reflections, and reflections, respectively; 13 – zones of high reflectivity in the lower crust from CDP profile VIII [3]; 14 – intersection points with other profiles. Shot point locations are shown by triangles above the profile

пределения  $\Delta G_a$  по линии профиля ГР-13 она коррелируется с максимальными значениями аномалий силы тяжести в пределах Черниговского гравитационного максимума и минимальными значениями геомагнитного поля [1]. В Днепровском сегменте к востоку от Черниговской антиформы высокоградиентная поверхность Мохо испытывает плавный подъем (ПК 370–520 км) от глубины ~45 до ~38 км (ПК 500 км) и затем происходит постепенное понижение уровня залегания до глубины ~41 км (ПК 610 км).

На всем протяжении Припятского прогиба, Брагинско-Лоевской седловины и сопредельного центриклинального замыкания Днепровского прогиба вдоль профиля ГР-13 (интервал ПК 60–370 км) в верхней части мантии вблизи поверхности Мохо и субпараллельно ей выделена еще одна высокоскоростная, но относительно низкоградиентная преломляющая граница субМохо с  $V_p = 8,35$ – $8,36$  км/с (под Припятским прогибом) и  $V_p = 8,35$  км/с (под западной центриклиналью Днепровского прогиба). Раздел субМохо, трассируемый преломленными волнами, залегает под западной и центральной частями Припятского прогиба на глубине ~49 км, а затем полого воздымается в сторону Брагинско-Лоевской седловины до ~45 км и на участке замыкания восточного крыла Черниговской антиформы поверхности Мохо резко погружается в верхнюю мантию. Наклонную часть границы субМохо непосредственно к востоку от Черниговской антиформы поверхности Мохо можно рассматривать как субвертикальную магистральную зону тектонического контакта крупных верхнемантийных Припятско-Брагинского и Днепровского ареалов ( $V_p = 8,36$ – $8,35$  и  $8,25$ – $8,20$  км/с соответственно). Проложение снизу вверх к границе Мохо проекции наклонной поверхности субМохо в соответствии с углом наклона отражает ее совмещение с восточным замыканием этой антиформы в интервале ПК 350–370 км. Очевидный вертикальный структурный парагенез Черниговской антиформы раздела Мохо и западного уступообразного склона нижнекорового высокоскоростного тела (которая определяется ниже как Западно-Днепровская рифтовая подушка – *gift pillow*) с несколько смещенным к востоку отмеченным выше резким погружением в мантию горизонта субМохо является наиболее четко выраженной неоднородностью в строении нижнего слоя земной коры и подкорового ареала верхней мантии, разделяющей Припятский и Днепровский сегменты земной коры и контролирующей положение субмеридиональных эшелонированных структур фундамента и чехла в зоне Брагинско-Лоевской седловины.

Предполагаемая инверсия скорости продольных волн в верхней мантии на глубинах 60–65–70 и 75–78 км связана с прослеживанием на сейсмоскоростной модели достаточно протяженных (140 и 190 км) пологих горизонтов с кажущейся скоростью, соответственно 8,05 (?) и 8,30 (?) км/с [1]. Если эти горизонты связаны с геологической реальностью, то они отражают неоднородность (расслоенность) литосферной верхней мантии под Припятским и Днепровским прогибами.

Судя по установленным в результате исследований по проекту ГР-13 скоростям продольных сейсмических волн  $V_p$  [1] и типовым моделям структуры земной коры [5], скоростные границы и уровни выше раздела Мохо на профиле Несвиж–Брагин разграничивают в основании Припятского прогиба условные основные слои консолидированной коры: верхний («гранитный») –  $V_p = 6,0$ – $6,4$  км/с, средний («диоритовый») –  $V_p = 6,4$ – $6,9$  км/с, нижний («базальтовый») –  $V_p = 7,0$ – $7,1$  км/с (см. рисунок). Главные внутрикоровые сейсмоскоростные границы – преломляющие, отражающие или сближенные в пространстве пакеты указанных горизонтов – на профиле Несвиж–Брагин маркируют отрицательную продольную структуру верхнего и среднего слоев под Припятским прогибом. В общем, он слабо выражен в сейсмоскоростной модели консолидированной коры. Здесь не наблюдается типичного для большинства палеорифтов подъема поверхности Мохо и уменьшения мощности коры в приосевой зоне. Результаты ГСЗ Евробридж-97 [2] и переинтерпретации данных по субпараллельному близкорасположенному профилю ОГТ [3] не подтвердили представления об активном механизме синрифтового развития Припятского прогиба, обусловленного воздействием гипотетического мантийного диапира. Он не отражен в структуре коро-мантийной границы и нижнего слоя коры [3].

Сравнительный анализ структуры консолидированной земной коры Припятского и Днепровского палеорифтовых грабенов позволяет выявить различия, которые определяют особенности их развития. По сравнению с плавными малодифференцированными структурными формами тонкой нижней коры Припятского грабена мощностью 7–9 км, восточней Брагинско-Лоевской седловины резко обособляется мощная (18 км) нижнекоровая Западно-Днепровская высокоско-

ростная региональная структура, которая интерпретируется как «рифтовая подушка» (rift pillow) Днепровского грабена. Механизм ее формирования, по-видимому, связан с плюмовыми верхне-мантийными процессами активного магматизма. Рифтовая подушка ограничена на западе высокоамплитудной флексурой над Черниговской антиформой поверхности Мохо – границей разноуровневого залегания подошвы консолидированной коры на Припятской и Днепровской ступенях. Западно-Днепровская «рифтовая подушка» вмещает субвертикальное высокоскоростное тело, выявленное еще в девяностые годы на поперечном профиле ГСЗ Пирятин–Талалаевка [4; 6]. На продольном профиле ГР-13 характеризуемый субвертикальный объект, по-видимому, соответствует участку зоны аномальной внутрислойной антиформы нижней коры на отрезке ПК 460–540 км. Высокоскоростная структура типа «рифтовой подушки» установлена и в Донецком сегменте ПДД авлакогена. На основе анализа преломленных и отраженных волн глубинных сейсмических зондирований по программе DOBRE на поперечном профиле Донецкого складчатого сооружения определено высокоскоростное тело с  $V_p = 6,90–7,20$  км/с мощностью до 15–20 км [7].

Генезис «рифтовых подушек», выявленный поперечными профилями ГСЗ Пирятин–Талалаевка (Днепровский грабен) и DOBRE (Донецкое складчатое сооружение), все исследователи связывают с интенсивной переработкой земной коры вследствие внедрения мантийных расплавов. С. Р. Egvin и L. D. McGinni [8] указывали применительно к реактивированному рифту Рилфут (Северо-Американская платформа) на формирование «рифтовой подушки» вследствие внедрения основных магм – как минимум в объеме 10 % в нижнюю кору в процессе рифтогенеза. Эти взгляды разделяют авторы модели глубинного строения Донбасса по меридиональному профилю DOBRE [7]. Формирование «субвертикального тела» в зоне субмеридионального профиля Пирятин–Талалаевка Днепровского грабена определяется украинскими геофизиками и геологами воздействием мантийных астенолитов (мантийных плюмов) [4; 6; 9; 10]. Можно обоснованно допустить, что формирование региональной Западно-Днепровской «рифтовой подушки» и приподнятое положение раздела Мохо в Днепровском грабене относительно Припятского, выявленное вдоль профиля ГСЗ Георифт-2013 Несвиж–Полтава, подтверждает концепцию существенной переработки земной коры к востоку от зоны Брагинско-Лоевской седловины вследствие проявления плюмовой тектоники в процессе герцинского рифтогенеза.

В Припятском прогибе строение коро-мантийной границы отличается от Днепровского более низким (на 5–6 км) уровнем залегания раздела Мохо и обособлением раздела субМохо. Последний восточнее Брагинско-Лоевской седловины, как отмечено выше, уходит в глубь верхней мантии. Высокоградиентная граница раздела Мохо, которая является единой для Припятско-Днепровской палеорифтовой системы, в пределах Припятского прогиба, в отличие от Днепровского, остается субгоризонтальной не только в продольном, но и в поперечном сечениях. В нижней коре Припятского прогиба по меридиональному профилю ГСЗ Евробридж-97 не выявлены субвертикальные тела с повышенными сейсмическими характеристиками [2], которые при наличии выступа поверхности Мохо в поперечном сечении приосевой части Припятского грабена могли бы свидетельствовать о воздействии мантийных диапиров (плюмов) на процессы герцинского рифтогенеза, как это показано для Днепровского грабена.

На профиле Георифт-2013 обращает на себя внимание суперпозиция высокоамплитудных Черниговской антиформы поверхности Мохо (ПК 305–370 км), западного флексуобразного склона Западно-Днепровской «рифтовой подушки» нижней коры (ПК 320–350 км) и резко нисходящего в глубь горизонта субМохо (ПК 370–420 км), разделяющего области относительно низкоскоростной верхней мантии под Днепровским сегментом и высокоскоростной – под Припятским и поперечным Брагинско-Лоевским сегментом. Эти особенности сейсмического разреза соответствуют зоне Черниговского максимума  $\Delta G_a$  и экстремальным значениям  $\Delta T_a$ . С рассматриваемой суперпозицией связаны пространственная близость или непосредственное совмещение Одесско-Гомельского глубинного тектонического шва и ареала проявления щелочно-основного магматизма в пределах северо-восточной части Припятского прогиба, Брагинско-Лоевской седловины, Гомельской структурной перемычки, Жлобинской седловины. Как показала З. М. Ляшкевич [11], две главные фазы вулканизма в северо-западной части Днепровского прогиба приходятся на позднефранское и фаменское время, а первые признаки проявления относятся к рубежу средний–поздний девон.

В Припятском прогибе главные фазы проявления магматизма датируются позднефранским (евлановско-ливенским) и раннефаменским (елецким) временем [12]. К самым древним магматическим образованиям, связанным с началом образования рифта, отнесены отдельные диатремы (трубки взрыва), закартированные в зоне сочленения Северо-Припятского плеча Припятского прогиба со Жлобинской седловиной и на территории последней. Их возраст датируется началом позднефранского времени. Среди поля развития диатрем, расположенного в 60 км южнее зоны сочленения Северо-Припятского плеча и Жлобинской седловины, ближе к Северному краевому разлому, наиболее ранние внедрения определяются поздневоронежским-раннеевлановским временем (средняя фаза позднего франа) [13]. В пределах же самого Припятского грабена и Брагинско-Лоевской седловины вулcano-магматическая деятельность началась еще позже – в евлановско-ливенское время (в конце позднего франа). Миграция начальных проявлений магматизма в пространстве и во времени вполне согласуется со стадийностью процессов рифтообразования и отмечена на примере развития многих континентальных рифтовых зон. На начальных стадиях рифтинга деструкции подвергались обширные площади, значительно превышающие ширину будущего Припятского грабена. По-видимому, припятский вулканизм не входил в обязательный перечень предрифтовых явлений или режимов, способствовавших образованию в коре первичных ослабленных зон и началу процессов рифтогенеза. Для Припятского прогиба характерна обратная временная и причинно-следственная связь – проявления вулканизма были вызваны процессом рифтогенеза [14]. В связи с отмеченной территориальной сопряженностью верхнедевонских щелочных магматических пород северо-восточной и восточной периферии Припятской зоны рифтогенеза и сопредельной Западно-Днепровской «рифтовой подушки», вероятно, находит решение проблема их мантийного источника. Подтверждается мнение В. П. Корзуна и А. С. Махначи [15], что эти магматические породы являются производными исходных магм, поднявшихся с глубин более 70–100 км. Возможно, возраст вулканогенных формаций этой зоны маркирует время наиболее активных региональных тектоно-геодинамических процессов, с ними были связаны формирование или реактивация наклонного участка раздела субМохо, разграничивающего области высокоскоростной и относительно низкоскоростной верхней мантии, и пространственно соответствующих ему в более высоких горизонтах коро-мантийной границы Черниговской антиформы поверхностей Мохо и западного замыкания Западно-Днепровской «рифтовой подушки». По-видимому, позднефранско-фаменский вулканизм отражает фазу наиболее активного проявления плюм-тектоники в Днепровском грабене и соответствует главной стадии рифтогенеза.

**Заключение.** Припятский палеорифт представляет собой замыкающий северо-западный сегмент ПДД авлакогена, который в ансамбле других сегментов – неинверсированного Днепровского палеорифта, инверсированных Донецкого складчатого сооружения и кряжа Карпинского – характеризуются особыми чертами строения, отражающими его формирование в условиях затухающего по простиранию с востока на запад рифтогенеза. Результаты ГСЗ Евробридж-97 и Георифт-2013 подтвердили представления о том, что формирование герцинского Припятского рифта в отличие от Днепровского с характерным для него влиянием мантийных астенолитов [9; 10], было связано с доминирующим пассивным механизмом рифтогенеза [14].

Днепровский и Припятский сегменты единого ансамбля внутриконтинентальных рифтовых структур в начальную фазу (соответственно, с раннего и позднего франа позднедевонской эпохи) развивались согласованно или квазисинхронно, но с различающимися автономными условиями проявления герцинского рифтогенеза.

На первоначальное проявление пассивного механизма рифтогенеза в Днепровском сегменте были наложены плюм-тектонические процессы, которые в его западной части проявились наиболее полно в позднефранское, фаменское время девонского периода и, возможно, в начале каменноугольного периода. По мнению многих украинских исследователей (А. В. Чекунов, В. Г. Гавриш, А. Е. Лукин, З. М. Ляшкевич и др.) указанное время, которое рассматривается нами как главная фаза рифтогенеза в Днепровском грабене, характеризовалось сильным проявлением магматизма, формированием блоковых структур, резким увеличением скорости и амплитуд погружения этих структур, высокоамплитудным разломообразованием. Вероятно, именно к этому времени относится мощная тектоно-термальная переработка нижнего и отчасти среднего слоев коры – активное формирование под западной частью Днепровского грабена и погранич-

ной зоной блокирующей поперечной Брагинско-Лоевской седловины высокоскоростного субширотного тела протяженностью ~230 км, отождествляемой с «рифтовой подушкой» (rift pillow). С этими процессами можно связывать генезис пологосводового поднятия поверхности Мохо в поперечных и приосевом продольном сечениях Днепровского грабена. Проявление здесь плюм-тектоники, скорее всего, стало своеобразным триггером, который привел (судя по структуре земной коры и поверхности Мохо) к смене пассивного механизма рифтогенеза – активным. Выявление исследованиями по программе «Георифт-2013» крупнейшей региональной нижнекоревой Западно-Днепровской рифтовой подушки подвело реальную геолого-геофизическую основу для обоснования масштабного проявления плюм-тектоники в этом звене ПДД авлакогена.

В Припятском сегменте, отделенном от Днепровского поперечными блокирующими эшелонированными глубинными структурами в зоне Брагинско-Лоевской седловины, строение коро-мантийной границы отличается по сравнению с Днепровским сегментом более низкими (на 5–6 км) уровнем залегания раздела Мохо и сформированной только в этом ареале протяженной субгоризонтальной границей субМохо. Высокоградиентная современная граница раздела Мохо, которая является единой для Припятско-Днепровской неинверсированной рифтовой системы в пределах Припятского прогиба, в отличие от Днепровского, является субгоризонтальной в поперечных сечениях. Здесь не проявились сколько-нибудь значимые по масштабу плюм-тектонические процессы. Их непосредственное или опосредованное влияние отразилось в повышенной деструкции и проницаемости земной коры в примыкающей к Днепровскому сегменту и подстилающей его Западно-Днепровской рифтовой подушке северо-восточной периферии Припятской зоны рифтогенеза на площади развития верхнефранско-фаменской щелочно-ультраосновной–щелочно-базальтоидной формации и близких по возрасту диатрем. Основная часть Припятского рифтового грабена развивалась на герцинской синрифтовой стадии вне области непосредственного геодинамического и геотермического влияния астеносферных плюмов Днепровского герцинского рифта на утолщенной по сравнению с последним консолидированной земной коре.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № X18P-109).

**Acknowledgements.** The work is supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Project no. X18P-109).

#### Список использованных источников

1. Litspheric structure along wide-angle seismic profile GEORIFT 2013 in Pripjat–Dnieper–Donetsk Basin (Belarus and Ukraine) / V. Starostenko [et al.] // *Geophysical Journal International*. – 2018. – Vol. 212, N 3. – P. 1932–1982. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx509>
2. Upper lithosphere seismic velocity structure across the Pripjat Trough and the Ukrainian shield along the Eurobridge'97 profile / H. Thybo [et al.] // *Tectonophysics*. – 2003. – Vol. 371, N 1–4. – P. 41–79. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(03\)00200-2](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(03)00200-2)
3. Juhlin, C. Reappraisal of deep seismic reflexion profil VIII across the Pripjat Trough / C. Juhlin, R. A. Stephenson, C. V. Klushin // *Tectonophysics*. – 1996. – Vol. 268, N 1–4. – P. 99–108. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(96\)00225-9](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(96)00225-9)
4. Егорова, Т. П. Результаты переинтерпретации и обобщения сейсмических материалов / Т. П. Егорова, Е. П. Баранова // *Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE*. – М., 2006. – С. 315–320.
5. Павленкова, Н. И. Структура земной коры и верхней мантии по сейсмическим данным / Н. И. Павленкова // *Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE*. – М., 2006. – С. 559–599.
6. Ильченко, Т. В. Некоторые аспекты эволюции Днепровско-Донецкого палеорифта (по данным ГСЗ) / Т. В. Ильченко // *Геофизический журн.* – 1997. – Т. 19, № 3. – С. 69–81.
7. Работы методом сейсмического зондирования по профилю DOBRE / М. Град [и др.] // *Строение и динамика литосферы Восточной Европы*. – М., 2006. – С. 321–327.
8. Ervin, C. P. Peelfoot rift: reactivated precursor to the Mississippi Embayment / C. P. Ervin, L. D. McGinnis // *Geol. Sos. Amer. Bull.* – 1975. – Vol. 86, N 9. – P. 1287–1295. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1975\)86%3C1287:rrrptt%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1975)86%3C1287:rrrptt%3E2.0.co;2)
9. Чекунов, А. В. К геодинамике Днепровско-Донецкой рифт-синеклизы / А. В. Чекунов // *Геофиз. журн.* – 1994. – Т. 16, № 3. – С. 1–12.
10. Гавриш, В. К. Заложение, развитие и нефтегазоносность палеорифтов Украины / В. К. Гавриш // *Рифтогенез и нефтегазоносность*. – М., 1993. – С. 29–36.
11. Ляшкевич, З. М. Магматизм Днепровско-Донецкой впадины / З. М. Ляшкевич // *Тектоника и магматизм Восточно-Европейской платформы*. – М., 1994. – С. 183–190.
12. Веретенников, Н. В. Верхнедевонский магматический комплекс / Н. В. Веретенников, В. П. Корзун, А. С. Махнач // *Геология Беларуси*. – Минск, 2001. – С. 446–459.

13. Кручек, С. А. Детальная стратиграфия девонских отложений Жлобинской седловины и сопредельных районов в связи с поисками полезных ископаемых / С. А. Кручек, Т. Г. Обуховская // Минерально-сырьевая база Республики Беларусь: поиски и перспективы. – Минск, 1997. – С. 19–21.
14. Айзберг, Р. Е. Синрифтовая геодинамика Припятского прогиба / Р. Е. Айзберг, Т. А. Старчик. – Минск, 2013. – 146 с.
15. Корзун, В. П. Верхнедевонская щелочная формация Припятской впадины / В. П. Корзун, А. С. Махнач. – Минск, 1977. – 154 с.

## References

1. Starostenko V. V., Janik T., Yegorova T., Czuba W., Środa P., Lysynchuk D., Aizberg R., Garetsky R., Karatayev G., Gribik Y., Farfuliak L., Kolomiyets K., Omelchenko V., Komminaho K., Tiira T., Gryn D., Guterch A., Legostaeva O., Thybo H., Tolkunov A. Lithospheric structure along wide-angle seismic profile GEORIFT 2013 in Pripyat–Dnieper–Donetsk Basin (Belarus and Ukraine). *Geophysical Journal International*, 2018, vol. 212, no. 3, pp. 1932–1982. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx509>
2. Thybo H., Janik T., Omelchenko V. D., Grad M., Garetsky R. G., Belinsky A. A., Karatayev G. I., Zlotski G., Knudsen M. E., Sand R., Yliniemi J., Tiira T., Luosto U., Komminaho K., Giese R., Guterch A., Lund C.-E., Kharitonov O. M., Ilchenko T., Lysynchuk D. V., Skobelev V. M., Doody J. J. Upper lithosphere seismic velocity structure across the Pripyat Trough and the Ukrainian shield along the Eurobridge'97 profile. *Tectonophysics*, 2003, vol. 371, no. 1–4, pp. 41–79. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(03\)00200-2](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(03)00200-2)
3. Juhlin C., Stephenson R. A., Klushin C. V. Reappraisal of deep seismic reflexion profil VIII across the Pripyat Trough. *Tectonophysics*, 1996, vol. 268, no. 1–4, pp. 99–108. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(96\)00225-9](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(96)00225-9)
4. Egorova T. P., Baranova E. P. Results of the Re-interpretation and Generalization of Seismic Materials. *Stroenie i dinamika litosfery Vostochnoi Evropy. Rezul'taty issledovaniy po programme EUROPROBE [Structure and Dynamics of the Lithosphere of Eastern Europe. Results of Studies under EUROPROBE Programme]*. Moscow, 2006, pp. 315–320 (in Russian).
5. Pavlenkova N. I. Structure of Earth's Crust and Upper Mantle by Seismic Data. *Stroenie i dinamika litosfery Vostochnoi Evropy. Rezul'taty issledovaniy po programme EUROPROBE [Structure and Dynamics of the Lithosphere of Eastern Europe. Results of Studies under EUROPROBE Programme]*. Moscow, 2006, pp. 559–599 (in Russian).
6. Ilchenko T. V. Some Evolutional Aspects of Dniepr and Donetsk Paleorift (by GZS Data). *Geofizicheskii zhurnal = Geophysical Journal*, 1997, vol. 19, no. 3, pp. 69–81 (in Russian).
7. Grad M., Guterch A., Keller R., Omel'chenko V. D., Starostenko V. I., Stifenson R. A., Stovba S. N., Tibo G., Tolkunov A. P. Works by the Method of Seismic Sensing on DOBRE Profile. *Stroenie i dinamika litosfery Vostochnoi Evropy. Rezul'taty issledovaniy po programme EUROPROBE [Structure and Dynamics of the Lithosphere of Eastern Europe. Results of Studies under EUROPROBE Programme]*. Moscow, 2006, pp. 321–327 (in Russian).
8. Ervin C. P., McGinnis L. D. Peelfoot rift: reactivated precursor to the Mississippi Embayment. *Geological Society of America Bulletin*, 1975, vol. 86, no. 9, pp. 1287–1295. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1975\)86%3C1287:rrrptt%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1975)86%3C1287:rrrptt%3E2.0.co;2)
9. Chekunov A. V. To the Geodynamics of Dnieper and Donetsk rift-syncline. *Geofizicheskii zhurnal = Geophysical Journal*, 1994, vol. 16, no. 3, pp. 1–12 (in Russian).
10. Gavrish V. K. The Development, Embedment, the Oil and Gas Content of the Paleorifts of Ukraine. *Riftogenez i neftegazonosnost' [Rifting Oil and Gas Potential]*. Moscow, 1993, pp. 29–36 (in Russian).
11. Lyashkevich Z. M. Magmatism of the Dnieper and Donetsk Basin. *Tektonika i magmatizm Vostochno-Evropeiskoi platformy [Tectonics and Magmatism of the Western European Platform]*. Moscow, 1994, pp. 183–190 (in Russian).
12. Veretennikov N. V., Korzun V. P., Mahnach A. S. Upper Devonian Igneous Complex. *Geologiya Belarusi [Geology of Belarus]*. Minsk, 2001, pp. 446–459 (in Russian).
13. Kruchek S. A., Obuhovskaya T. G. Detailed Stratigraphy of Devonian Deposits of the Zhlobin Saddle and Adjacent Areas in Connection with Minerals Search. *Mineral'no-syr'evaya baza Respubliki Belarus': poiski i perspektivy [Mineral-Raw Base of the Republic of Belarus: Searchings and Prospects]*. Minsk, 1997, pp. 19–21 (in Russian).
14. Ayzberg R. E., Starchik T. A. *Synrift Geodynamics of the Pripyat Trough*. Minsk, 2013. 146 p. (in Russian).
15. Korzun V. P., Mahnach A. S. Devonian Alkaline Formation of the Pripyat Basin. Minsk, 1977. 154 p. (in Russian).

## Информация об авторах

*Айзберг Ромма Ефимович* – член-корреспондент, д-р геол.-минералог. наук, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: chistaya@nature.basnet.by.

*Грибик Ярослав Гаврилович* – канд. геол.-минералог. наук, заведующий лабораторией. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yaroslavgribik@tut.by.

## Information about the authors

*Aizberg Romma Yefimovich* – Corresponding Member, D. Sc. (Geology), Chief researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoryna Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chistaya@nature.basnet.by.

*Gribik Yaroslav Gavrilovich* – Ph. D. (Geology), Head of the Laboratory. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoryna Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yaroslavgribik@tut.by.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ****TECHNICAL SCIENCES**

УДК 620.22:678.742.3

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-480-487>

Поступило в редакцию 14.02.2018

Received 14.02.2018

**Член-корресподент С. С. Песецкий, Ю. М. Кривогуз***Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси,  
Гомель, Республика Беларусь***СМЕСИ АЛИФАТИЧЕСКИХ ПОЛИАМИДОВ  
С ФУНКЦИОналиЗОВАННЫМИ ПОЛИОЛЕФИНАМИ:  
МЕЖФАЗНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ОСОБЕННОСТИ РЕОЛОГИЧЕСКОГО  
ПОВЕДЕНИЯ РАСПЛАВОВ, СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

**Аннотация.** Исследовано влияние добавки 28 мас. % функционализированных полиолефинов (фПО) – смесей полиэтилена и сополимера этилена с высшим олефином, содержащих 0,43 и 0,77 мас. % привитого мономера, имеющего в своем составе две карбоксильные группы, к алифатическим полиамидам ПА6 и ПА66 на особенности структуры, реологическое поведение расплавов и механические свойства смесевых материалов. Исследуемые материалы получали методом реакционного смешения компонентов в расплаве в экструзионном реакторе-смесителе. Показано, что для смесей ПА66/фПО характерны более существенные изменения анализируемых характеристик по сравнению с таковыми на основе ПА6 при варьировании концентрации привитого мономера. Установлено аномально резкое повышение (более чем на два десятичных порядка) вязкости расплава смеси ПА66 с фПО, содержащем 0,77 мас. % привитого мономера, по сравнению с вязкостью исходного ПА66, что обусловлено спецификой межфазных взаимодействий в смесях.

**Ключевые слова:** алифатический полиамид, полиолефин, смеси полиамидов с полиолефинами, функционализация полиолефинов, межфазные взаимодействия

**Для цитирования:** Песецкий, С. С. Смесии алифатических полиамидов с функционализированными полиолефинами: межфазные взаимодействия, особенности реологического поведения расплавов, структуры и механических свойств / С. С. Песецкий, Ю. М. Кривогуз // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 480–487. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-480-487>

**Corresponding Member Stepan S. Pesetskii, Yuri M. Krivoguz***V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus***BLENDS OF ALIPHATIC POLYAMIDES WITH FUNCTIONALIZED POLYOLEFINS: INTERPHASE  
INTERACTIONS, FEATURES OF THE RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF MELTS, STRUCTURE  
AND MECHANICAL PROPERTIES**

**Abstract.** The effect of addition of functionalized polyolefins (fPO) in an amount of 28 wt. % – mixtures of polyethylene and copolymer of ethylene with higher olefin containing 0.43 and 0.77 wt. % grafted monomer having two carboxyl groups in its composition – to aliphatic polyamides PA6 and PA66 on the structural features, the rheological behavior of melts and the mechanical properties of mixed materials was investigated. The materials studied were prepared by reactive mixing of the components in a melt in an extrusion reactor. It is shown that mixtures of PA66/fPO are characterized by more significant changes in the characteristics under analysis compared with those based on PA6 when the concentration of a grafted monomer is varied. An abnormally sharp increase (by more than two decimal orders) of the melt viscosity of a mixture of PA66 with fPO containing 0.77 wt. % of the grafted monomer, compared with the viscosity of initial PA66, is due to the specificity of the interphase interactions in the mixtures.

**Keywords:** aliphatic polyamides, polyolefins, mixtures of polyamides with polyolefins, functionalization of polyolefins, interphase interactions

**For citation:** Pesetskii S. S., Krivoguz Yu. M. Blends of aliphatic polyamides with functionalized polyolefins: interphase interactions, features of the rheological behavior of melts, structure and mechanical properties. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 480–487 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-480-487>

**Введение.** Смеси термопластичных полимеров привлекают к себе неослабевающее внимание вследствие возможностей сочетания лучших характеристик в одном материале, устранения недостатков отдельных компонентов при смешении, реализации комплекса показателей недостижимых для гомополимеров при быстром и экономически выгодном расширении марочного ассортимента [1]. Среди полимерных смесей инженерно-технического назначения особое место вследствие комплекса уникальных потребительских свойств принадлежит смесям алифатических полиамидов (ПА) с полиолефинами (ПО) [2]. Главными их преимуществами перед гомополиамидами являются повышенная ударная вязкость, пониженное водопоглощение, улучшенные технологичность при переработке и стабильность размеров при переменной влажности, более низкая стоимость. Учитывая, что среди алифатических ПА наиболее распространены ПА6 и ПА66 (в странах Западной Европы на их долю приходится ~92 % всех производимых ПА), роль которых как инженерных пластиков примерно одинакова [1], то и смесевые системы создаются, главным образом, на базе этих полиамидов.

Из-за высокой плотности энергии когезии (соответственно 23,2 и 23,3 (Дж · см<sup>-3</sup>)<sup>0,5</sup> – для ПА6 и ПА66) алифатические ПА не совместимы с ПО, для которых данный показатель существенно ниже (16,1 (Дж · см<sup>-3</sup>)<sup>0,5</sup> – для полиэтилена и 16,3 (Дж · см<sup>-3</sup>)<sup>0,5</sup> – для полипропилена) [2]. Поэтому смеси ПА/ПО характеризуются высоким поверхностным натяжением (14–18 Н/м), низкой межфазной адгезией и выраженным фазовым разделением [2].

Экономически выгодным путем получения технологически совместимых смесей, которым присущи необходимые и полезные с коммерческой точки зрения свойства, является реакционное совмещение компонентов. Технология подобных материалов базируется, главным образом, на смешении в расплаве ПА с ПО, предварительно функционализированными прививкой мономеров, содержащих в своем составе полярные функциональные группы (чаще всего ангидридные или карбоксильные) [3]. Функциональные группы привитых мономеров при смешении в расплаве могут вступать в обычные химические реакции, наблюдаемые в низкомолекулярных органических веществах [3; 4]. Потенциально возможны взаимодействия функционализированных полиолефинов в смесях с полярными полимерами от сильного ковалентного или ионного (кислотно-основного) связывания до относительно слабых взаимодействий, приводящих к образованию водородных, ион-дипольных, диполь-дипольных и донорно-акцепторных связей [2; 4].

Несмотря на то что смеси ПА/фПО выпускаются в промышленном масштабе [1] механизм взаимодействия фПО с макромолекулами ПА, содержащими, как правило, концевые аминные и карбоксильные группы, а также внутрицепные амидные группы, полностью не выяснен. Следует учитывать, что амидные группы значительно менее реакционноспособны, чем концевые первичные аминокгруппы [4; 5]. Однако поскольку концентрация внутрицепных амидных групп существенно более высокая, чем аминокгрупп, то вклад взаимодействий с участием первых из них может быть весьма весомым.

Цель работы – анализ специфики взаимодействий макромолекул ПА6 и ПА66 в смесях с фПО, содержащих в своем составе привитый мономер с функциональными карбоксильными группами, а также обусловленных этими взаимодействиями особенностей структуры и свойств смесевых материалов.

**Материалы и методы исследования.** Объектами исследования служили ПА6 производства ОАО «Гродно Азот» (марка для контакта с пищевыми продуктами); ПА66 (марка 27EN, производство фирмы Pingdingshan Senma Engineering Plastics Co. LTD, Henan, КНР). В качестве фПО использовали смесь полиэтилена с сополимером этилена и высшего олефина, функционализированную прививкой мономера – ненасыщенной дикарбоновой кислоты (производство ИММС НАН Беларуси, ТУ ВУ 400084698.170–2008); фПО получали путем свободнорадикальной прививки мономера в расплаве при использовании в качестве реактора двухшнекового экструдера

TSSK-35/40 (производство КНР, диаметр шнеков 35 мм, отношение  $L / D = 40$ , число независимых секций обогрева материального цилиндра 10). Содержание привитого мономера (степень прививки в фПО), определенное по методике [6], составляло 0,43 и 0,77 % (здесь и далее концентрацию выражали в мас. %). Функционализированные таким образом смеси обозначены соответственно как фПО-I и фПО-II. Показатели свойств исходных полимерных компонентов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Показатели свойств исходных полимерных компонентов

T a b l e 1. Properties of the initial polymer components

Компонент Component	Содержание привитого мономера, мас. % The content of the grafted monomer, wt. %	ПТР, г/10 мин MFI, g/10 min	$\eta \cdot 10^{-3}$ , Па · с $\eta \cdot 10^{-3}$ , Pa · s	$\gamma$ , с <sup>-1</sup> $\gamma$ , s <sup>-1</sup>	$T_{пл}$ , °C $T_m$ , °C	$T_{кр}$ , °C $T_{cr}$ , °C
ПА6	–	8,4	1,135	17,32	223,0	192,5
ПА66	–	41,0 (141,2*)	0,233 (0,159*)	84,26	265,0	235,0
ПО	–	2,2	11,203	4,06	109,3; 117,7	101,3
фПО-I	0,43	0,5	50,975	0,89	110,0; 116,2	100,5
фПО-II	0,77	0,4	63,024	0,79	112,0; 117,4	98,0

П р и м е ч а н и е: \* – значения показателей определены при нагрузке  $P = 50$  Н;  $\gamma$  – скорость сдвига при течении расплава через капилляр.

N o t e: \* – The values of the indicators are determined at a load  $P = 50$  N;  $\gamma$  – shear rate at melt flow through the capillary.

Для получения смесевых композитов гранулированные компоненты (ПА6, ПА66 и исходные ПО или фПО) смешивали между собой и с порошкообразной стабилизирующей добавкой (антиоксидант «Irganox 1010» производства BASF, ФРГ) в двухлопастном смесителе. Грануляты ПА6 и ПА66 предварительно высушивали до остаточной влажности не более 0,1 %. Далее полученную механическую смесь, включающую 28 % ПО или фПО и 0,3 % стабилизатора, подвергали соэкструзии в расплаве. Температура в основных зонах смешения материального цилиндра экструдера TSSK-35/40 составляла 250 °C для смесей на основе ПА6 и 275 °C – для ПА66.

Полученные таким образом грануляты смесевых материалов высушивали до остаточной влажности  $\leq 0,1$  % и использовали для анализа реологических свойств расплавов. Анализ осуществляли с помощью прибора RAY-RAN TEST EQUIPMENT Ltd, Великобритания, позволяющего фиксировать значения показателя текучести (ПТР) и вязкости ( $\eta$ ) расплава. Значения ПТР определяли согласно ГОСТу 11262–76 при диаметре капилляра 2,095 мм, нагрузке  $P = 21,6$  Н (кроме отдельных экспериментов) и температуре  $T = 250$  и 275 °C для композитов на базе ПА6 и ПА66 соответственно.

Изготовление экспериментальных образцов осуществляли литьем под давлением на термопластавтомате EN-30 (Тайвань) с объемом впрыска 30 см<sup>3</sup>.

Образцы для испытаний методом растяжения представляли собой лопатки типа 5 по ГОСТу 11262–80 с размером рабочей части 45 × 5 × 2 мм. Испытания проводили на универсальной машине Instron 5567 (Великобритания) при скорости нагружения 50 мм/мин.

Анализ кристаллической структуры материалов осуществляли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (микроккалориметр Diamond DSC, фирма Perkin Elmer, США, навеска 7 мг, скорость нагрева-охлаждения 15 °C/мин).

**Результаты и их обсуждение.** Особый интерес представляет анализ реологических свойств расплавов исследуемых материалов, поскольку вязкость (текучесть) расплава при прочих равных условиях сильно зависит от межфазных превращений [7]. В общем случае вязкость расплава полимерной смеси ( $\eta_{см}$ ) зависит от вязкости расплавов компонентов и состава смеси [1; 7]. Характер взаимовлияния компонентов полимерной смеси на  $\eta_{см}$  может быть охарактеризован при использовании логарифмического правила [2; 8]:

$$\log \eta_{\text{см}} = \sum \varphi_i \log \eta_i, \quad (1)$$

где  $\varphi_i$  и  $\eta_i$  – соответственно объемная доля и вязкость расплава  $i$ -го компонента смеси.

Известны четыре типа полимерных смесей. Среди них аддитивные смеси, вязкость расплава которых подчиняется уравнению (1). Смеси с положительным и отрицательным отклонением от этого уравнения, для которых характерны соответственно повышенные или пониженные значения  $\eta_{\text{см}}$ . Последнее характерно для несовместимых компонентов со слабыми межфазными взаимодействиями. И наконец, смеси, обнаруживающие в зависимости от условий течения как положительное, так и отрицательное отклонение  $\eta_{\text{см}}$  от аддитивных значений (подобный вид зависимости характерен для материалов, в которых происходят фазово-структурные превращения при течении) [2].

Сопоставление данных по вязкости и текучести расплавов ПА/ПО и ПА/фПО (табл. 2) свидетельствует о сильном влиянии концентрации прививаемого к ПО мономера на реологическое поведение расплавов смесевых материалов.

Т а б л и ц а 2. Показатели реологических свойств смесевых материалов, а также потеря массы ( $\Delta m$ ) после их экстракции в муравьиной кислоте

T a b l e 2. Indicators of the rheological properties of the mixture materials, as well as mass loss ( $\Delta m$ ) after their extraction in formic acid

Смесевой материал Mixed material	ПТР, г/10 мин MFI, g/10 min	$\eta_{\text{см}} \cdot 10^{-3}$ , Па · с $\eta_{\text{mix}} \cdot 10^{-3}$ , Pa · s	$\gamma$ , с <sup>-1</sup> $\dot{\gamma}$ , s <sup>-1</sup>	$\Delta m$ , % $\Delta m$ , %
ПА6/ПО	8,7	1,237	15,90	72,4
ПА6/фПО-I	2,7	3,977	4,94	70,3
ПА6/фПО-II	1,0	10,809	1,82	68,0
ПА66/ПО	30,7 (76,2*)	0,351	56,05	72,8
ПА66/фПО-I	10,0 (20,0*)	1,076	18,26	66,0
ПА66/фПО-II	1,3*	18,682	2,44*	63,0

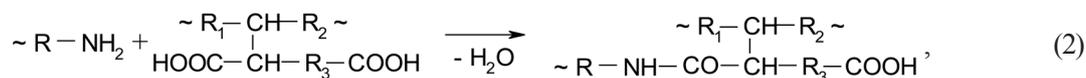
П р и м е ч а н и я: \* – значения показателей определены при нагрузке  $P = 50$  Н;  $\Delta m$  – количество ПА, вымываемого из смесевых материалов при его экстракции в муравьиной кислоте.

N o t e s: \* – The values of the indicators are determined at a load  $P = 50$  N;  $\Delta m$  – the amount of PA eluted from the mixture material when it is extracted in formic acid.

При использовании в смесях исходных (не функционализированных) ПО их вязкость близка к таковой для исходных ПА, что свидетельствует о слабом межфазном взаимодействии в них. Поскольку скорость сдвига, как видно из табл. 2, при реологических измерениях имеет относительно низкую величину, то можно полагать, что экспериментально определенная  $\eta_{\text{см}}$  примерно соответствует ньютоновской вязкости. Прививка мономера к макромолекулам ПО приводит к росту вязкости их расплавов. Как видно из табл. 1, для фПО-I ПТР снижается по сравнению с исходным ПО в 4,4 раза, а для фПО-II – в 5,5 раз. Для вязкости смесевых материалов характерны более сильные изменения, особенно при использовании в качестве второго компонента фПО-II с повышенной (0,77 %) концентрацией привитого мономера. Так, вязкость смеси ПА6/фПО-II в 8,4 раза превышает таковую для исходного ПА6 и в 8,7 раз – для композита ПА6/ПО. В случае смесей ПА66/фПО-II наблюдается феноменально резкое снижение текучести расплава, который при нагрузке  $P = 21,6$  Н вообще не вытекает из капилляра, а при  $P = 50$  Н его вязкость более, чем в 117,5 раз превышает таковую для исходного ПА66, т. е. повышение вязкости расплава ПА66 в смесях с фПО многократно более высокое, чем ПА6 при тех же соотношениях компонентов и это несмотря на то что вязкость расплава исходного ПА6 почти в пять раз превышает таковую для ПА66. Эти данные свидетельствуют о сильном отклонении реологического поведения расплавов ПА/фПО от уравнения (1) и чрезвычайно высокой зависимости значений показателей реологических свойств смесей ПА/фПО (особенно смесей на основе ПА66) от концентрации привитого карбоксилсодержащего мономера. Следует отметить, что повышение степени прививки мономера от 0,43 до 0,77 % не приводит к заметному изменению реологических свойств исходных фПО (значения ПТР для фПО-I и фПО-II равны соответственно 0,5 и 0,4 г/10 мин). Это озна-

чает, что решающий вклад в повышение вязкости смесевых ПА композитов при увеличении концентрации привитого мономера в структуре фПО должны вносить специфические межфазные взаимодействия. Потенциально возможные взаимодействия макромолекул ПА с фПО можно представить следующим образом.

Во-первых, возможны реакции концевых аминогрупп полиамидов с привитыми карбоксильными группами в структуре фПО, приводящие к образованию привитых сополимеров [9]:

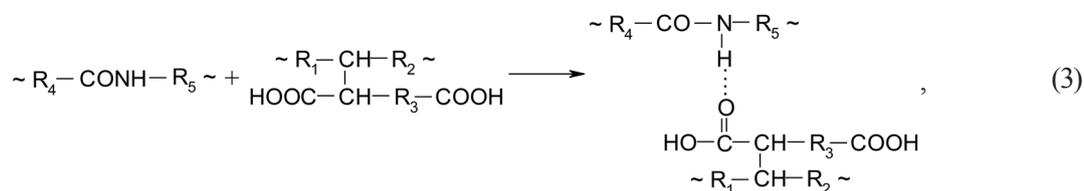


где R – фрагмент цепи ПА, связанный с концевой аминогруппой; R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> – фрагменты макромолекул фПО; R<sub>3</sub> – углеводородный радикал в структуре прививаемого мономера.

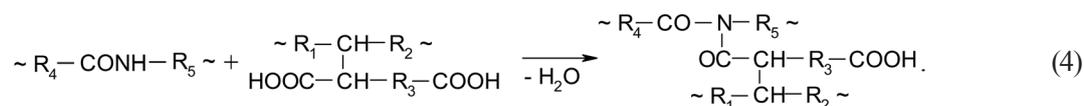
При взаимодействии с фПО концевых аминогрупп разнородных макромолекул ПА наряду с прививкой должно происходить удлинение полиамидных цепей.

Внутрицепные амидные группы –NH–CO– макромолекул ПА могут взаимодействовать с фПО с образованием межцепных водородных и (или) ковалентных связей [9–11]:

образование межцепных водородных связей



где R<sub>4</sub> и R<sub>5</sub> – фрагменты макромолекул ПА, связанные с амидной группой;  
ковалентное связывание



Очевидно, что в зависимости от стерических и других факторов возможно протекание одновременно взаимодействий по схемам (2)–(4) или различных их сочетаний. Реализация каждой из них непременно приводит к росту вязкости расплавов смесей вследствие увеличения молекулярной массы, межцепного сшивания или повышения степени разветвленности макромолекул ПА.

Поскольку водородные связи лабильны [12] и могут обратимо диссоциировать при переменной температуре (разрушаться, когда компоненты смеси находятся в расплаве), то очевидно, что основной вклад в изменение реологических свойств расплавов ПА должны вносить реакции по концевым NH<sub>2</sub> группам, приводящие к образованию привитых сополимеров и удлинению цепи (2), а также процессы взаимодействия внутрицепных амидных групп с карбоксильными группами привитого мономера в структуре макромолекул фПО. Так как, в отличие от ПА6, в макромолекулах ПА66 могут присутствовать две концевые первичные аминогруппы, то вклад реакций, протекающих с участием этих групп в композитах ПА66/фПО, может быть более существенным. Кроме того, как следует из сопоставления химической структуры повторяющихся звеньев макромолекул ПА6 ([–NH–(CH<sub>2</sub>)<sub>5</sub>–CO–]<sub>n</sub>) и ПА66 ([–NH–(CH<sub>2</sub>)<sub>6</sub>–NHCO–(CH<sub>2</sub>)<sub>4</sub>–CO–]<sub>n</sub>) при одинаковом значении гетероцепной характеристики, равной отношению числа амидных групп к числу метиленов в структуре элементарного звена, в полиамиде 6 число метиленовых групп в звене нечетное, в полиамиде 66 – четное. Как показано в [9] данный факт может иметь решающее значение в пространственной ориентации фрагментов макромолекул ПА и реакционной способности их функциональных групп вследствие этого, что, видимо, имеет большое значение в повышении выхода продуктов межцепных взаимодействий, протекающих по схеме (4) и приводящих к более интенсивному росту вязкости расплава смесей ПА66/фПО.

Протекание межцепных реакций должно приводить к образованию как привитых, так и частично пространственно сшитых сополимеров. Данный факт подтверждается экспериментально при анализе экстракции смесей в муравьиной кислоте, являющейся одним из наиболее эффек-

тивных растворителей алифатических ПА [9]. При отсутствии специфических взаимодействий между фПО и ПА последние должны относительно легко экстрагироваться из смеси ПА/фПО. Полного удаления полиамидной фазы при этом может не произойти вследствие ограничения диффузионных процессов из-за пространственных затруднений (механические зацепления макромолекул, блокирование фазы ПА полиолефином и т. п.).

Результаты экспериментов по экстракции приведены в табл. 2. Из нее видно, что доля экстрагируемых ПА6 и ПА66 из смесей с исходным ПО существенно более высокая, чем из смесей на основе фПО. Повышение концентрации привитого мономера в фПО приводит к снижению доли ПА, вымываемого растворителем из смеси ПА/фПО при экстракции. В однотипных смесях количество экстрагируемого ПА6 превосходит таковое для ПА66. Например, из смеси ПА6/фПО-II при экстракции удаляется 68 % ПА6, а из смеси ПА66/фПО-II – 63 % ПА66, что является подтверждением более интенсивного взаимодействия макромолекул ПА66 с фПО, приводящего к образованию ковалентных межцепных связей, не разрушающихся при воздействии сильного растворителя.

Протекание межфазных взаимодействий в смесях сказывается на их физической структуре, что фиксируется методом ДСК, а также механических характеристиках. Как видно из рис. 1, на кривых нагрева смесей ПА/фПО в отличие от таковых с нефункционализированным ПО проявляются дублетные пики в температурной области плавления полиамидов.

Причем оба максимума дублетных пиков сдвинуты в сторону низких температур по сравнению со значением температуры плавления ( $T_{пл}$ ) для полиамидов в смесях с исходным ПО. Дублетные пики плавления характерны и для фазы фПО в смесях (табл. 3).

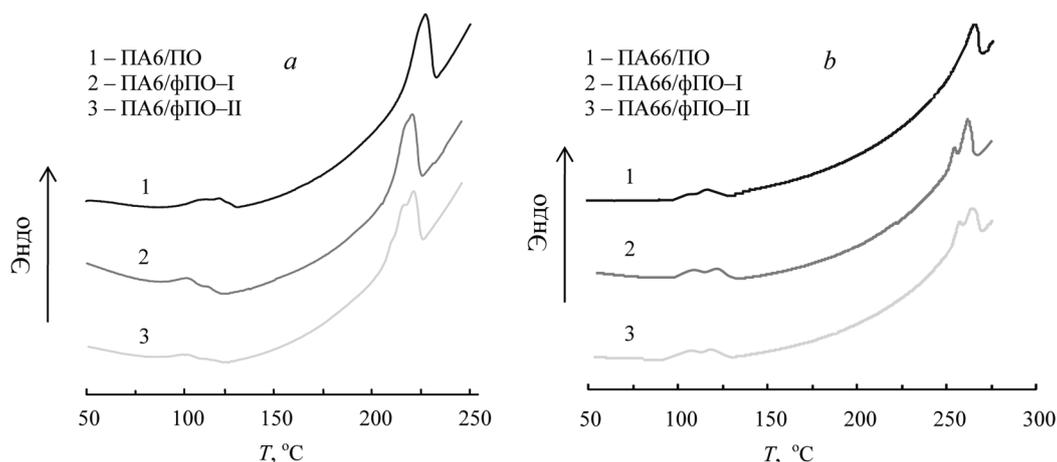


Рис. 1. ДСК кривые при нагреве смесей ПА6 (а), ПА66 (б) с ПО и фПО  
 Fig. 1. DSC curves at heating of mixtures of PA6 (a), PA66 (b) with PO and fPO

Т а б л и ц а 3. Параметры, характеризующие плавление и кристаллизацию компонентов ПА смесей

Table 3. Parameters characterizing the melting and crystallization of PA mixture components

Смесь Blends	Полиолефиновая фаза Polyolefin phase		Полиамидная фаза Polyamide phase		
	$T_{пл}^*$ , °C $T_m^*$ , °C	$T_{кр}^*$ , °C $T_{cr}^*$ , °C	$T_{пл}^*$ , °C $T_m^*$ , °C	$T_{кр}^*$ , °C $T_{cr}^*$ , °C	$\Delta H_{кр}^*$ , Дж/г $\Delta H_{cr}^*$ , J/g
Смеси на основе ПА 6 Blends based on PA 6					
ПА6/ПО	117,2	102,7	222,9	193,3	49,1
ПА6/фПО-I	106; 117,3	94,8; 103,9	220,7	190,1	48,9
ПА6/фПО-II	105; 118; 0	92,3; 100,8	215,9; 220,9	189,2	43,4
Смеси на основе ПА 66 Blends based on PA 66					
ПА66/ПО	106,2; 118,4	102,3	265,4	235,3	43,4
ПА66/фПО-I	105,8; 118,5	94,4; 102,7	254,4; 262,0	233,9	40,8
ПА66/фПО-II	106,2; 118,6	92,4; 101,9	257,6; 263,8	236,8	40,2

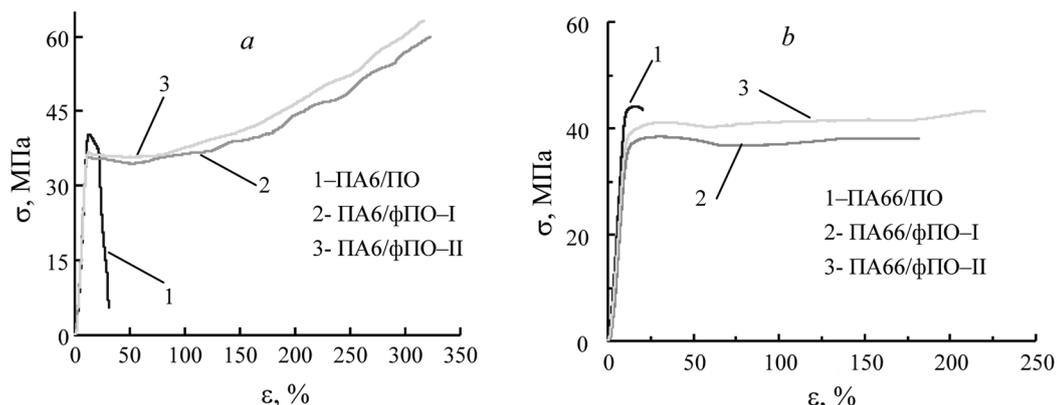


Рис. 2. Деформационные кривые смесевых материалов на основе ПА6 (а) и ПА66 (b)

Fig. 2. Deformation curves of mixed materials based on PA6 (a) and PA66 (b)

Следует полагать, что причиной проявления дублетных пиков плавления является образование привитых сополимеров, наличие которых, несомненно, должно снижать плотность упаковки макромолекул в межфазных слоях и, как следствие, значение  $T_{пл}$  компонентов. Интенсивные взаимодействия в межфазных областях ограничивают молекулярную подвижность и затрудняют кристаллизацию ПА в смесях, что фиксируется по снижению значений температуры кристаллизации ( $T_{кр}$ ) и теплоты кристаллизации ( $\Delta H_{кр}$ ), а значит и степени кристалличности фазы ПА (табл. 3).

На рис. 2 представлены деформационные кривые растяжения смесевых материалов, из которых следует, что их характер определяется типом использованного полиолефина. Разрушение образцов смесей ПА/ПО происходит при малых значениях относительного удлинения ( $\epsilon_r$ ) до начала образования шейки. Использование в смесях фПО способствует существенному повышению деформационной способности ПА материалов (для смесей ПА6/фПО  $\epsilon_r$  возрастает до 11,6 раз, а для ПА66/фПО – до 7,9 раз). Следует отметить, что смеси ПА6/фПО упрочняются на стадии деформирования шейки и их прочность при растяжении ( $\sigma_p$ ) примерно в 1,7 раз превышает верхний предел текучести ( $\sigma_T$ ). Причиной этого является ориентационное упрочнение микрофибрил, образующихся на стадии рекристаллизации материала в шейке [13]. При растяжении смесей ПА66/фПО упрочнения материала не наблюдается. Разрушающее напряжение при разрыве  $\sigma_p$  для ПА66/фПО близко к величине верхнего предела текучести  $\sigma_{ТВ}$ . Это происходит, видимо, вследствие различия в структуре кристаллитов ПА6 и ПА66 в смесях. Важно отметить, что с увеличением степени прививки мономера значения показателей механических свойств повышаются (рис. 2, кривые 2, 3). Очевидной причиной этого является интенсификация межфазных взаимодействий в смесях.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о решающей роли межфазных взаимодействий в формировании структуры и достижении значений реологических и механических характеристик смесевых материалов ПА/фПО. Определяющее влияние на уровень упомянутых взаимодействий и показателей свойств оказывает как природа ПА, так и концентрация привитого полярного мономера в структуре фПО, что следует учитывать в технологии коммерческих смесевых материалов. Особое внимание при этом следует обращать на феноменально резкий рост вязкости расплава смесей ПА66/фПО при повышении концентрации привитого мономера в относительно узком диапазоне.

#### Список использованных источников

1. Полимерные смеси / под ред. Д. Р. Пола, К. Б. Бакнелла. – СПб., 2009. – 606 с.
2. Jurkowski, B. Functionalized polyolefins and aliphatic polyamide blends: interphase interactions, rheology and high elastic properties of melts / B. Jurkowski, S. S. Pesetskii // Polyolefin Blends / ed. D.Nwabanma, T. Kyu. – New Jersey, 2008. – Ch. 18. – P. 527–555.
3. Chung, T. C. Functionalization of polyolefins / T. C. Chung. – San Diego, 2002. – 274 p.

4. Moad, G. The synthesis of polyolefin graft copolymers by reactive extrusion / G. Moad // *Progress in Polymer Science*. – 1999. – Vol. 24, N 1. – P. 81–142. [https://doi.org/10.1016/s0079-6700\(98\)00017-3](https://doi.org/10.1016/s0079-6700(98)00017-3)
5. Duin, M. V. Blends of polyamides and maleic-anhydride-containing polymers: interfacial chemistry and properties in reactive modifiers for polymers / M. V. Duin, R. D. M. Borggreve // *Reactive Modifiers for Polymers* / ed. S. Al. Malaika. – London, 1997. – P. 133–162.
6. Определение эффективности прививки функциональных групп к макромолекулам полиолефинов методом ИК-спектроскопии / С. С. Песецкий [и др.] // *Весті АН Беларусі. Сер. хім. навук*. – 1997. – № 4. – С. 15–19.
7. White, J. L. Rheological behavior of molten polymer blends and particle-filled melts / J. L. White // *Polymer Compatibility and Incompatibility: Principles and Practices* / ed. K. Sols. – London, 1980.
8. Strategies for compatibilization of polymer blends / C. Koning [et al.] // *Progress in Polymer Science*. – 1998. – Vol. 23, N 4. – P. 707–757. [https://doi.org/10.1016/s0079-6700\(97\)00054-3](https://doi.org/10.1016/s0079-6700(97)00054-3)
9. Коршак, В. В. Гетероцепные полиамиды / В. В. Коршак, Т. М. Фрунзе. – М., 1962. – 523 с.
10. Amine/anhydride reaction versus amide/anhydride reaction in polyamide/anhydride carriers / P. Marechar [et al.] // *J. Polymer Science*. – 1995. – Vol. 33, N 5. – P. 757–766. <https://doi.org/10.1002/pola.1995.080330501>
11. Oshinski, A. J. The role of matrix molecular weight in rubber thoghened nylon 6 blends. 1. Morphology / A. J. Oshinski, H. Keskkula, D. R. Paul // *Polymer*. – 1996. – Vol. 37, N 22. – P. 4891–4907. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(96\)00373-4](https://doi.org/10.1016/0032-3861(96)00373-4)
12. Пиментел, Дж. Водородная связь / Дж. Пиментел, О. Мак-Клеллан. – М., 1964. – 462 с.
13. Бартнев, Т. М. Физика и механика полимеров / Т. М. Бартнев, Ю. В. Зелнев. – М., 1983. – 392 с.

## References

1. Paul D. R., Bucknell K. B., eds. *Polymeric mixtures*. Saint Petersburg, Scientific foundations of technology, 2009. 606 p. (in Russian).
2. Jurkowski B., Pesetskii S. S. Functionalized polyolefins and aliphatic polyamide blends: interphase interactions, rheology and high elastic properties of melts. Nwabunma D., Kyu T., eds. *Polyolefin Blends*. New Jersey, 2008, ch. 18, pp. 527–555.
3. Chung T. C. *Functionalization of polyolefins*. San Diego, 2002. 274 p.
4. Moad G. The synthesis of polyolefin graft copolymers by reactive extrusion. *Progress in Polymer Science*, 1999, vol. 24, no. 1, pp. 81–142. [https://doi.org/10.1016/s0079-6700\(98\)00017-3](https://doi.org/10.1016/s0079-6700(98)00017-3)
5. Duin M. V., Borggreve R. D. M. Blends of polyamides and maleic-anhydride-containing polymers: interfacial chemistry and properties in reactive modifiers for polymers. Malaika S. Al., ed. *Reactive Modifiers for Polymers*. London, 1997, pp. 133–162.
6. Pesetskii S. S., Kuzavkov A. I., Kasperovich O. M., Krivoguz Yu. M. Determination of the effectiveness of grafting functional groups to macromolecules of polyolefins by IR spectroscopy. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 1997, no. 4, pp. 15–19 (in Russian).
7. White J. L. Rheological behavior of molten polymer blends and particle-filled melts. Sols K., ed. *Polymer Compatibility and Incompatibility: Principles and Practices*. London, 1980.
8. Koning C., Duin M. V., Pagnou-lee C., Jerome R. Strategies for compatibilization of polymer blends. *Progress in Polymer Science*, 1998, vol. 23, no. 4, pp. 707–757. [https://doi.org/10.1016/s0079-6700\(97\)00054-3](https://doi.org/10.1016/s0079-6700(97)00054-3)
9. Korshak V. V., Frunze T. M. *Heterochain polyamides*. Moscow, 1962. 523 p. (in Russian).
10. Marechar P., Coppens G., Legras R., Deconinck J. M. Amine/anhydride reaction versus amide/anhydride reaction in polyamide/anhydride carriers. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 1995, vol. 33, no. 5, pp. 757–766. <https://doi.org/10.1002/pola.1995.080330501>
11. Oshinski A. J., Keskkula H., Paul D. R. The role of matrix molecular weight in rubber thoghened nylon 6 blends. 1. Morphology. *Polymer*, 1996, vol. 37, no. 22, pp. 4891–4907. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(96\)00373-4](https://doi.org/10.1016/0032-3861(96)00373-4)
12. Pimentel J., McClellan O. *Hydrogen bond*. Moscow, 1964. 462 p. (in Russian).
13. Bartnev T. M., Zelenev Yu. V. *Physics and mechanics of polymers*. Moscow, 1983. 392 p. (in Russian).

## Информация об авторах

*Песецкий Степан Степанович* – член-корресподент, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом. Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси (ул. Кирова, 32а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: otdel5mpri@tut.by.

*Кривогуз Юрий Михайлович* – канд. техн. наук, доцент, заведующий сектором. Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси (ул. Кирова, 32а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: yurikriv@tut.by.

## Information about the authors

*Pesetskii Stepan Stepanovich* – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department. V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: otdel5mpri@tut.by.

*Krivoguz Yuri Mikhailovich* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Sector. V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: yurikriv@tut.by.

**СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ**  
**SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES**УДК 330.1  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-488-494>Поступило в редакцию 08.06.2018  
Received 08.06.2018**Академик В. Г. Гусаков***Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ОСНОВЫ СИСТЕМНОЙ ЭКОНОМИКИ**

**Аннотация.** Экономика – это система, включающая совокупность рычагов и механизмов регулирования, методов и мер поддержки и развития, методик оценки, схем и моделей стратегического устройства, инструментария текущей настройки и т. п. В связи с этим системная экономика означает приведение совокупности мер и инструментов в соответствующую систему, позволяющую достигать определенного целевого эффекта. Значит, системную экономику можно представить как научно упорядоченную экономику, где все структурные составляющие имеют свое место и выполняют отведенную роль, функционируют как целостный комплекс и позволяют получать запрограммированный результат. Такая экономика исключает стихийность развития и противоречивость действия совокупности мер и инструментов. Вместе с тем в Беларуси предмет системной экономики пока не разрабатывается, в связи с чем все разделы экономики представляются разрозненно, что не позволяет достичь синергетической эффективности хозяйствующих субъектов на практике.

Исследования показывают, что системная экономика имеет устоявшуюся инфраструктуру, представленную пятью основными уровнями: наноэкономика, микроэкономика, мезоэкономика, макроэкономика и мегаэкономика. Системная экономика не только является сбалансированным взаимодействием составляющих ее мер и рычагов, но и «делает» это на основе новейших идей, инноваций и высоких технологий, поскольку восходит к интеллекту, материализованному в инновациях.

Установлено, что первейшей закономерностью системной экономики является ее базирование на интеллекте. Независимо от сферы генератором воспроизводства и устойчивости служит научно-инновационный потенциал. Еще одной закономерностью системной экономики следует назвать акцент на реальное материальное производство, хотя предполагается оптимальный баланс реальных (материальных) и нематериальных отраслей. Равновесие отраслей различных сфер занятости – это неотъемлемый атрибут любой современной экономической инфраструктуры, приводимой в действие механизмами системной экономики.

Подчеркивается, что систематизирующие идеи и инновации составляют основную ценность человеческого капитала, определяют его уровень конкурентности, способность работать на опережение. Капитал творческих личностей, в первую очередь ученых, должен рассматриваться как фундаментальная база генерирования новых идей, умения подобрать кадры и нацелить их на выработку новых конкурентных решений ради более значимых результатов экономической деятельности.

**Ключевые слова:** системная экономика, наноэкономика, микроэкономика, мезоэкономика, макроэкономика, мегаэкономика

**Для цитирования:** Гусаков, В. Г. Основы системной экономики / В. Г. Гусаков // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 488–494. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-488-494>

**Academician Vladimir G. Gusakov***Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***FUNDAMENTAL OF SYSTEMIC ECONOMY**

**Abstract.** Economy is a system, including a set of levers and regulatory mechanisms, methods and measures for support and development, evaluation methods, schemes and models of strategic devices and tools, current setting, etc. In this regard, system economics implies a whole set of measures and instruments in the appropriate system to achieve the target effect. Then the economy system can be represented as a scientifically ordered economy, where all structural components have their place and

fulfill the role of functioning as a holistic system and allow you to get the programmed result. Such an economy eliminates the spontaneity of development and inconsistency of actions of a set of measures and instruments. However, in Belarus the subject of system of the economy has not yet developed, therefore all sections of the economy are presented separately, does not allow to achieve synergetic efficiency of economic entities in practice.

Research shows that system economics has its well-established infrastructure. It has five main levels: nanoeconomics, microeconomics, mesoeconomics, macroeconomics and megaeconomics. System Economics goes back to the intelligence, persisted in innovation, it not only represents a balanced interaction of measures and levers, but “doing” is based on the latest ideas, innovations and high technologies.

It is established that the first pattern in the system of Economics is based on intelligence. Regardless of the field generator for the reproduction and sustainability is a scientific-innovative potential. Another natural system of the economy should be the emphasis on real material production, although it is assumed the optimum balance of real (material) and intangible industries. The balance of industries in different spheres of employment – is an essential attribute of any modern economic infrastructure, driven by the mechanisms of the system of the economy.

In this regard, the article emphasizes that systematizing ideas and innovations constitute the main value of human capital determines his level of competition, the ability to be proactive. Capital creative individuals, primarily scientists, should be considered as the fundamental base for generating new ideas, the ability to select personnel and to encourage them to develop new competitive solutions for the more significant results of economic activities.

**Keywords:** system economics, nanoeconomics, microeconomics, mesoeconomics, macroeconomics, megaeconomics

**For citation:** Gusakov V. G. Fundamental of systemic economy. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 488–494 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-488-494>

Углубленный анализ различных экономических теорий отечественных и зарубежных авторов приводит к необходимости системных исследований и системной экономике, в центре которой должна быть парадигма: «наука–экономика–рынок». Доминирующая сейчас стратегия либеральных авторов, где в центре находится рынок, без учета базиса и специфики экономики, по меньшей мере, является малопродуктивной, а для экономического уклада, построенного на крупном товарном производстве, – еще и разрушительной. Рассуждения о либерализации экономики, курсах валют, рыночном саморегулировании производства и сбыта, инфляции платежного средства, весьма далеки от подлинно экономических законов и закономерностей и ориентированы на чуждые интересы. Они ставят национальную экономику в зависимость от внешних регуляторов и делают ее слабым продуктом мощной и агрессивной валютной системы, находящейся за рубежом (в небольшой группе развитых стран).

Подлинная и полноценная национальная экономика всегда формируется самой страной на основе имеющегося технико-технологического потенциала всех отраслей экономики и в первую очередь на потенциале реального сектора экономики и крупнотоварного производства (например, крупной промышленности) и выстраивается снизу вверх, а не наоборот, как предлагают международные финансовые структуры. Так, внизу экономика должна начинаться с реализации инновационных идей и проектов, осуществления технико-технической модернизации крупных товарных предприятий, формирующих основной состав валового внутреннего продукта, а по сути с научных и инновационных разработок как основных факторов технико-технологического развития и инвестиционной промышленности. Без научных разработок и их реализации посредством инвестиций не может быть достаточной конкурентоспособности, устойчивых перспектив и стабильной привлекательности предприятий. А без системного обеспечения устойчивости развития реального сектора экономики с крупнотоварным производством экономика страны продолжительное время эффективно функционировать не может. Надстроечные сектора и виртуальные сферы не могут составлять реальный материальный базис экономики и делать акцент на их приоритетности. Это весьма опасно. Они очень зависимы от внешнего воздействия и могут в любой момент впасть в кризис, увлекая за собой всю макроэкономику страны. Поэтому надстроечные сектора могут быть лишь вспомогательными в реальной экономике, составляющей прочный каркас национального крупнотоварного производства. Следовательно, разговоры о макроэкономике без понимания, поддержки и развития микроэкономики реальных отраслей и прежде всего крупнотоварных предприятий, выглядят схоластично и необоснованно.

**Что такое системная экономика?** Любая экономика это система, включающая совокупность рычагов и механизмов регулирования, методов и мер поддержки и развития, методик оценки, схем и моделей стратегического устройства, инструментария текущей настройки и т. п.

В связи с этим системная экономика означает приведение всей этой совокупности мер и инструментов в соответствующую систему, позволяющую достигать определенного целевого эффекта. Значит, системную экономику можно представить как научно упорядоченную экономику, где все структурные составляющие имеют свое место и выполняют отведенную роль, функционируют как целостный комплекс и позволяют получать запрограммированный результат. Такая экономика исключает стихийность развития и противоречивость действия совокупности мер и инструментов. Да, она не исключает рынок, который по прежнему основывается на принципах спроса и предложения, но делает его регулируемым с помощью законодательно-правовых норм и ставит его не во главу экономической системы (с его стихийностью), а превращает в производную категорию от деятельности производственно-сбытовой сферы, т. е. предполагает параллельное функционирование товарного производства и рынка, а в отдельных случаях, где невозможна или нецелесообразна конкуренция, даже подчиняет сферу рынка сфере производства.

Системная экономика имеет свою устоявшуюся инфраструктуру, которая строится, как уже было сказано, снизу. Она имеет пять основных уровней: наноэкономика, микроэкономика, мезоэкономика, макроэкономика и мегаэкономика.

В частности, *наноэкономика* представляет собой экономику физических лиц и семей, по другому ее можно назвать еще индивидуальная, или семейная экономика. Она выстраивается на личностных и межличностных отношениях, где имеет место многообразие экономических связей и где формируются потребительские стоимости и спрос. Здесь также обеспечивается удовлетворение потребительского спроса и проявляются первичные оценки качества продукции, включая возмущения восприятием товара.

Кроме того, наноэкономика охватывает сферу индивидуального предпринимательства, основанного на интеллекте и живом труде частных лиц и их семей. Здесь проявляется право интеллектуальной собственности, которое регулируется внутристрановым и международным законодательством. Главное, что наноэкономика является исходной точкой формирования в последующем большого экономического дерева. Все зависит от установок физических личностей и их семей. Если частные лица настроены на творчество и созидание, формируют больше стоимостей, чем потребляют, наноэкономика становится эффективной. А учитывая необходимость расширения самозанятости населения, эффективная наноэкономика активно способствует росту всех других уровней экономической инфраструктуры. Если же наноэкономика нацелена на проедание и сплошной патернализм сверху, сложно рассчитывать, что все другие экономические уровни будут неэффективными.

*Микроэкономика* известна как экономика предприятий всех форм. Экономические отношения здесь также выстраиваются на принципах спроса и предложения, а для поддержания конкурентоспособности необходимо задействовать творческий и интеллектуальный потенциал работников. Чтобы быть в тренде, предприятиям приходится непрерывно совершенствовать технику, технологии, качество продукции, ассортимент, формы продажи и т. п. Процессы диверсификации нацеливают на развитие межхозяйственных и межотраслевых связей, что приводит к необходимости кооперации и интеграции труда и ресурсов. Но выстраивать бизнес-модели развития предприятий сегодня без учета состояния и тенденций наноэкономики и влияния институциональных факторов уже практически невозможно, если речь идет о непрерывном росте человеческого капитала и его отдачи. Использование новейших технологий и интеллектуализация производства происходят по большей части на основе отношений наноэкономики. Взаимодействие и конкурентоспособность предприятий в немалой степени основываются на эксклюзивных решениях и технологиях менеджеров и работников, их интеллекте, формах наноэкономики.

*Мезоэкономика* в настоящее время представляет собой экономику регионов и отраслей, где доминируют территориальные и отраслевые интересы проживающих и занятых в них людей. Мезоэкономика наиболее полно характеризует деятельность предприятий, действующих в определенной местности или отрасли, их конкурентные преимущества, складывающиеся под влиянием предпринимательских способностей, в основе чего находится наноэкономика. Особенность мезоэкономики в том, что она призвана создавать наиболее благоприятные условия реализации местных и отраслевых ресурсов, в первую очередь прикладных, технологических и челове-

ских. Здесь важно организовать эффективное использование всех видов ресурсов – возобновляемых и невозобновляемых. Известно, что возобновляемыми ресурсами являются интеллектуальные, творческие, трудовые, которые относятся к категории наноэкономики. Достаточно сказать, что инновационность экономики предприятий лежит в основе экономической идеи и мысли. Компетентность менеджеров и специалистов, способных наладить эффективное взаимодействие микро- и наноэкономики, в данном случае может служить доминирующим фактором регионального или отраслевого развития.

*Макроэкономика* в настоящее время позиционируется как экономика страны, выражающаяся в принципах, механизмах и формах формирования и использования государственного бюджета, на основе которого достигаются многие социальные, экономические, общественные и политические цели и задачи. Инструментами макроэкономики являются налоговые, кредитные, протекционистские, инвестиционные, ценовые, научно-технические, торговые и иные отношения, обеспечивающие необходимый уровень благосостояния общества и качество жизни человека. Макроэкономика нацеливает на стимулирование роста интеллектуализации экономики, создание и поддержание необходимого баланса высококачественных и безопасных товаров. Макроэкономика невозможна без устойчивого развития наноэкономики, микроэкономики и мезоэкономики. Устойчиво развивающаяся макроэкономика – это комплекс благоприятных условий развития всех других уровней экономики.

*Мегаэкономика* – это в настоящее время система вхождения макроэкономики в мировое экономическое пространство и состояние самой мировой экономики. Активную роль здесь играют международные экономические институты и объединения (Всемирный Банк, ВТО, ООН и др.). Существенное значение имеют также международные индикаторы экономического и неэкономического развития, рейтинговые агентства, финансовые центры и др. Для активной и прочной интеграции макроэкономики в мировую экономику и получения от этого преимуществ необходимы конкурентоспособность и устойчивость экономики конкретных государств. Сильные макроэкономики являются, как правило, донорами мегаэкономики и выступают ее доминантами, в связи с чем могут диктовать условия развития и вхождения в мировое пространство более слабым макроэкономикам. В связи с этим происходят перетоки капиталов, которые в конечном итоге концентрируются в составах более экономически состоятельных макроэкономик. Наряду с перетоками финансовых капиталов наблюдаются миграционные процессы человеческого и интеллектуального капиталов, в результате чего наиболее сильный интеллектуальный капитал концентрируется в наиболее развитых странах, способных создать преимущественные условия для реализации интеллекта. Важно знать: где лучше всего условия для функционирования интеллектуальной собственности и где высоко мотивируется интеллектуальный труд, туда и устремляется мобильный и самый ценный интеллектуальный капитал, создающий новые возможности устойчивого и ускоренного развития. Следовательно, мегаэкономика строится не только на воспроизводстве и переливах финансового (инвестиционного) капитала, но и на мобильности, трансформации и концентрации интеллектуального потенциала, формой которого является наноэкономика.

В системной экономике интеллект, научная идея, инновация первичны, они создают финансовый капитал. Понимая это, наиболее развитые страны вкладывают в первую очередь капиталы в научно-интеллектуальные центры и научно-инновационные результаты. Это прежде всего затрагивает уровень нано- и микроэкономики, который определяет все другие уровни системной экономики.

Надо подчеркнуть, что нано- и микроэкономика имеют свою внутреннюю структуру и состоят из экономики личности и семьи; экономики интеллекта; экономики человеческого капитала; экономики трудовых ресурсов; экономики интеллектуальной собственности; экономики инвестиций в развитие человека; экономики мотиваций и личностных ориентаций и инноваций.

Эти структурные составляющие определяют начало любых направлений экономического развития системной экономики, включая мезо-, макро- и мегаэкономику. Так, состояние нано- и микроэкономики лидирующих стран уже многие годы задает тенденции всей мировой экономике. Финансовая и валютная устойчивость государств основывается на возможности капита-

лизации идей, инноваций и результатов интеллектуальной деятельности. Например, любое предприятие стремится производить высококачественный товар, пользующийся спросом. В настоящее время, как известно, это невозможно вне рамок интеллектуальной собственности и без необходимых инноваций. В условиях конкуренции любую технологию требуется периодически совершенствовать и обновлять. Для этого необходимы генераторы идей и разработчики инноваций, а также ноу-хау, делающие бизнес инвестиционно привлекательным. Качество и конкурентоспособность производства определяются качеством идей и инноваций.

**Экономика системной экономики.** Системная экономика восходит к интеллекту, материализованному в инновациях, она не только представляет собой сбалансированное взаимодействие составляющих ее мер и рычагов, но «делает» это на основе новейших идей, инноваций и высоких технологий.

Систематизирующие идеи и инновации составляют основную ценность человеческого капитала, определяют его уровень конкурентности, способность работать на опережение. Капитал творческих личностей, в первую очередь ученых, должен рассматриваться как фундаментальная база генерирования новых идей, умения подобрать кадры и нацелить их на выработку новых (эксклюзивных) конкурентных решений ради более значимых результатов экономической деятельности. Задача подбора, подготовки и стимулирования труда творческих личностей непростая. Известно большое неравенство между людьми по интеллекту, но часто это не выглядит достоинством или недостатком. Системная экономика служит своего рода индикатором, чтобы ведущие позиции занимали способные и творческие работники. Поэтому реальная оценка интеллекта может быть дана только по итогам интеллектуальной деятельности по формализованным и материализованным результатам. Конечно, лучше если это будет происходить по мультипликативному эффекту, по итогам реализации совокупности идей, включая идеи партнеров, за определенный период времени.

Одним из основных измерителей интеллектуального потенциала, как и человеческого капитала вообще в системной экономике, должна стать интеллектуальная собственность, которую создают менеджеры, специалисты, ученые и творческие личности. Общий размер и уровень качества интеллектуальных результатов (продуктов интеллектуальной собственности), созданных и получивших товарную форму, определяет степень интеллектуализации общества.

Для государства ученый и творческая личность значительно ценнее, чем, например, очередной сменяемый чиновник, поскольку:

государство (общество) тратит намного больше на подготовку ученого;

оно получает от ученого инновационный продукт, окупаемость которого может с избытком перекрыть все затраты;

настоящих ученых – генераторов идей в любом обществе совсем немного, но они могут не только формировать достаточное количество интеллектуального продукта, а и создавать имидж самой стране;

интеллектуальный потенциал формирует потенциальные возможности всего государства.

Чем шире и значительнее интеллектуальный потенциал, тем достойнее государственный строй, власть, страна. Тем проще преодолеваются любые экономические противоречия. Хорошо известен тот факт, что тупиков в экономике не бывает, они в головах людей. И если в обществе доминирует интеллектуальный потенциал, то таких тупиков вообще не возникает (ученые и специалисты могут прогнозировать развитие ситуации), а если и появляются, то легко преодолеваются.

Слабая сторона интеллектуального капитала состоит в том, что если государство ослабляет свою поддержку научно-инновационной сферы, то мобильный высококвалифицированный человеческий капитал быстро вымывается из творческих областей, а его место занимает либо слабоподготовленный и в силу этого малорезультативный, либо, что еще хуже, место интеллектуальной собственности, создаваемой отечественными учеными и специалистами, занимает интеллектуальная собственность, импортируемая извне. Это, естественно, вызывает мощный отток валютных средств и долгосрочную зависимость страны от внешних инновационных поставок. Потребительское отношение государства к интеллектуальной сфере обрекает экономику на инерционность существования с низкими, а иногда и отрицательными темпами роста ВВП.

Самая высокодоходная сфера экономики, это, как известно, область научно-инновационной деятельности, поскольку, как уже неоднократно сказано учеными и специалистами, здесь образуется самая высокая норма прибыли. Для этого необходимы, конечно, инвестиции, но их окупаемость намного превышает отдачу капитала во всех других сферах человеческой деятельности. Успех там, где во главе – интеллектуальный капитал, способный воспроизводить конкурентноспособный инновационный продукт, создаваемый и реализуемый по следующей технологической цепочке: научные знания → идея → научное исследование → научно-инновационная разработка → промышленная инновационная технология и продукция → рыночный товарооборот → добавленная стоимость → чистая добавленная прибыль. Так, творческие личности на первых двух этапах имеют множество идей, не выходящих на рынок, но не располагают финансами. На двух последующих этапах специалисты и ученые обладают возможностью глубоких и комплексных исследований и при соответствующем обеспечении ресурсами могут создать конкурентные научно-инновационные разработки, но они также не располагают достаточными инвестициями. Лишь на пятом переделе возможно обеспечить промышленное производство инновационной продукции на основе разработанной научной технологии, но здесь участие непосредственно ученых уже почти не требуется, поэтому творцы и разработчики инноваций и здесь не получают необходимой мотивации. На шестой и последующих стадиях инновационный продукт составляет рыночный товарооборот, где образуется добавленная стоимость, прибавочный продукт и прибыль, которую присваивают себе промышленные и торговые структуры, часто абсолютно незаинтересованные отдавать некоторую долю прибавочного дохода ученым и изначальным разработчикам инноваций. Именно этот технологический процесс от идеи до прибыли является сейчас наиболее противоречивым, где в самом проигрышном положении находятся ученые и творческие работники. Процесс этот законодательно почти не урегулирован и, следовательно, между учеными, находящимися на начальных стадиях создания идей и инноваций, и торговыми маклерами и предпринимателями, действующими на заключительных переделах материализации инноваций и формирования дополнительной прибыли, складываются противоречивые взаимоотношения.

Интеллектуальный капитал как наиболее ценный человеческий капитал в ходе его реализации в инновации и материализации на практике и служащий важнейшей экономической категорией практики остается совершенно неизученным в отечественной экономике, требует неотложного системного обобщения как в целях преодоления противоречий между научно-инновационной средой и промышленно-торговой сферой, так и в целях повышения его значимости в самой экономике.

Целью построения интеллектуальной экономики является максимизация роста ВВП за счет роста инновационности всех субъектов национальной экономики.

Инновационная экономика является результирующим звеном интеллектуальной экономики или по иному нано- и микроэкономики. Все, что создается в системной экономике на уровне экономики человеческого капитала и на уровне экономики интеллектуальной собственности в итоге воплощается в инновационной экономике, которая в свою очередь порождает и развивает новые генерации товарного производства, обладающего специфической стоимостью, имеющей форму интеллектуального капитала. Инновационная экономика базируется на фундаменте человеческого капитала, а именно на экономике интеллектуальной собственности, результатами которой являются новейшие технологии, виды продукции, содержащие мультипликативный эффект.

Важно подчеркнуть, что основные элементы системной экономики уже функционируют, и не только в развитых странах, но и в Республике Беларусь. Но в отличие от развитых стран, где системная экономика формирует основные объемы роста ВВП, в Беларуси она разорвана по отраслям (т. е. в каждой отрасли выстраивается своя система регулятивных мер и механизмов, которые не стыкуются между собой на межотраслевом уровне) и поэтому не дает желаемого результата. Например, умаление роли науки в инновационном развитии экономики, в том числе посредством недостаточного бюджетного финансирования, превращает ее из производительной силы в сферу риторической неопределенности, где много всевозможных ожиданий, но нет реальной реализации интеллектуального потенциала. Тем не менее в Беларуси имеется достаточно неплохой потенциал интеллектуальной экономики, который может служить связующим звеном между наукой и реальным сектором для выстраивания системной экономики. Ожидаемое преоб-

разование ныне известной экономики отраслей в системную вполне логично. Системная экономика имеет сквозную структуру, поскольку в ней экономические субъекты и объекты (отрасли, сферы, предприятия, специалисты и генераторы инноваций) приобретают общую логику развития, в основе чего происходит максимальная реализация интеллектуального капитала.

Первейшей закономерностью системной экономики является ее базирование на интеллекте. Независимо от сферы генератором воспроизводства и устойчивости служит научно-инновационный потенциал.

Еще одной закономерностью системной экономики можно назвать акцент на реальное материальное производство, хотя предполагается оптимальный баланс реальных (материальных) и нематериальных отраслей. Равновесие отраслей различных сфер занятости – это неотъемлемый атрибут любой современной экономической инфраструктуры, но равновесие это должно строго поддерживаться материальной сферой. Надо однозначно признать, что, например, сфера услуг, в том числе и сфера виртуальной экономики (ИТ), тогда устойчива, когда есть стабильно развивающееся материальное производство. Иначе, при ослаблении реальной экономики вся надстроечная инфраструктура может в одночасье рухнуть. Известно, что надстроечные сферы очень непостоянны и зависимы не только от внутренних факторов стабилизации, но и внешней конъюнктуры. Это подтверждается всем ходом мировой экономики. Экономически сильны те страны, где в первую очередь сильным и устойчиво развивающимся является реальный сектор, который способен создать максимальные условия для эффективного функционирования и нематериального сектора. Стабильность и востребованность материального производства создает все условия для надстроечных структур.

Однако устойчиво развивающаяся надстроечная инфраструктура может создавать иллюзию своей автономности и независимости от реального сектора экономики. Вот это чаще всего и замечают экономисты-рыночники и приверженцы приоритетного развития надстроечной инфраструктуры, в том числе виртуальной экономики. Им кажется, что это именно тот конек, на котором можно преодолеть многие трудности материального производства, и быстро, без особых инвестиций в инновации можно достичь вершин экономического развития. На самом деле – это самообман и основан он на поверхностном знании системной экономики, на отсутствии представления о причинно-следственной связи между реальной и надстроечной экономикой. Большинство развитых стран наглядно демонстрируют, что первопричиной всякой целесообразной экономической динамики выступает реальная экономика с ее материальным производством, направленным на комплексное обеспечение и обслуживание материальных потребностей общества, где в основе развития находятся интеллектуальные ресурсы и инновации, в совокупном плане представляющие собой современную систему экономики.

### Список использованных источников

1. Леонтьев, Б. Б. О начале формирования системной экономики / Б. Б. Леонтьев, В. Б. Леонтьева // *Экономические стратегии*. – 2017. – Т. 19, № 7. – С. 30–45.
2. Социально-экономическая модель: становление и развитие: теория, методология, практика / А. И. Лученок [и др.]; под общ. ред. В. Г. Гусакова: в 2 кн. – Минск, 2015. – Кн. 1. – 554 с.

### References

1. Leont'ev B. B., Leont'eva V. B. On the beginning of the formation of a systemic economy. *Ekonomicheskie strategii = Economic Strategies*, 2017, vol. 19, no. 7, pp. 30–45 (in Russian).
2. Luchenok A. I., Gusakov V. G., Daineko A. E., Pekut'ko P. N., Vardevanyan G. M., Dedkov S. M., Goncharov V. V., Korshunov A. M., Kolotukhin V. A., Laevskaya N. O., Mel'nikova I. N., Medvedev V. F., Pochekina V. V. *Socio-economic model: formation and development: theory, methodology, practice*. Minsk, 2015, book 1. 554 p. (in Russian).

### Информация об авторе

Гусаков Владимир Григорьевич – академик, д-р эконом. наук, профессор, Председатель Президиума Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: office@presidium.bas-net.by.

### Information about the author

Gusakov Vladimir Grigorievich – Academician, D. Sc. (Economics), Professor, Chairman of Presidium. National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: office@presidium.bas-net.by.

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

УДК 141  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-495-503>

Поступило в редакцию 03.05.2018  
Received 03.05.2018

**Н. С. Щёкин**

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

## **ИНСТИТУАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ДИАЛОГА ЦЕРКВИ И ГОСУДАРСТВА В ЗАПАДНОЕВРОПЕЙСКОЙ ФИЛОСОФСКОЙ ТРАДИЦИИ**

*(Представлено академиком Е. М. Бабосовым)*

**Аннотация.** Проведена реконструкция теократических моделей диалога церкви и государства. Центральной проблемой сообщения является экспликация возникновения социально-исторической ситуации, в очередной раз потребовавшей по-новому сформулировать традиционную проблему взаимодействия церкви и государства как значимого ресурса в достижении социального консенсуса и успешного развития общества в целом. Обоснована стратегия социодинамики современного общества, в которой постоянное и конструктивное взаимодействие церкви и государства должно рассматриваться как необходимый и уникальный по своим цивилизационным возможностям ресурс успешного разрешения как глобальных, так и регионально-локальных проблем и противоречий современного мира. Анализ истории Европы и последующая секуляризация ее культурного пространства обосновывает тот факт, что именно выработка стратегии взаимодействия церкви и государства привели к тому, что христианские культурные ценности, оставаясь во многом смыслообразующей константой европейской культуры, устраивают свою клерикальную природу и успешно интегрируются в светский культурный ландшафт.

**Ключевые слова:** диалог церкви и государства, институализация, западноевропейская цивилизация, религия, светская и духовная власть, Ренессанс, Новое время

**Для цитирования:** Щёкин, Н. С. Институализация моделей диалога церкви и государства в западноевропейской философской традиции / Н. С. Щёкин // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 495–503. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-495-503>

**Nikolai S. Shchekin**

*Institute of Sociology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

## **INSTITUTIONALIZATION OF MODELS OF DIALOGUE BETWEEN CHURCH AND STATE IN WESTERN EUROPEAN PHILOSOPHICAL TRADITION**

*(Communicated by Academician Evgenii M. Babosov)*

**Abstract.** The theocratic models of dialogue between church and state were reconstructed. The central problem of the article is the explication of emergence of the socio-historical situation that once again called for a new formulation of the traditional problem of the church and state interaction as a significant resource for achieving a social consensus and a successful development of society as a whole. The strategy of socio-dynamics of modern society is substantiated, in which the constant and constructive church and state interaction should be considered as a necessary and unique resource for its civilizational capabilities to successfully resolve both global and regional-local problems and contradictions of the modern world. The analysis of the history of Europe and a subsequent secularization of its cultural space justify the fact that just the elaboration of the strategy of the church and state interaction led to the situation that Christian cultural values, remaining in many respects a meaningful constant of the European culture, arrange their clerical nature and successfully integrate into the secular cultural landscape.

**Keywords:** dialogue of church and state, Christianity, institutionalization, Western European civilization, religion, secular and spiritual power, Renaissance, New time

**For citation:** Shchekin N. S. Institutionalization of models of dialogue between church and state in Western European philosophical tradition. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 495–503 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-495-503>

**Введение.** В начале XXI в. мировое сообщество сталкивается с определенным ренессансом религии в социально-гуманитарных исследованиях. Одной из очевидных тенденций современного мирового развития является рост религиозности, который еще называют «реваншем Бога» [1, с. 51].

Становление моделей диалога церкви и государства относится к периоду позднего Ренессанса, когда закладывался фундамент современного общественно-политического сознания и когда начинались процессы секуляризации общественной жизни.

В это же время начинают складываться нормы международного права, призванные регулировать отношения между ними, которые должны носить диалогический характер и в идеале способствовать установлению «вечного мира». Реформация как раз закладывала необходимый религиозно-идеологический фундамент для отстаивания этими государствами своих интересов, консолидации политической власти и выхода из сферы вызывавшего раздражение и противодействие влияния папства.

**Основная часть.** В эпоху позднего Ренессанса возникает новая концептуальная модель взаимоотношений церкви и государства, практическая реализация которой во многом определила генезис и развитие индустриальной цивилизации. В ее основе лежит идея государственного суверенитета, которая исключала паритет светской и духовной власти и получила разработку в творчестве основоположника немецкого протестантизма **Мартина Лютера**. Показательно, что в его многотомном духовном наследии нашли отражение философские проблемы политики и права. Так, испытав сильное влияние учения Августина о двух Градах, он, однако, отказывается от него, поскольку сама идея государственного суверенитета несовместима со смешением светской и духовной властей.

М. Лютер решительно не приемлет претензии католической власти на суверенитет. Его позицию отчетливо характеризует отношение к интерпретации католическими теологами положения Евангелия от Луки: «Они сказали: Господи! вот, здесь два меча. Он сказал им: довольно» [2, От Луки святое благовествование, 22.38.], которые наделяют папу как духовным, так и мирским мечами, что противоречит Священному писанию. Вводя в курс проблемы герцога Саксонского, которому адресован трактат, Лютер пишет: «Поскольку весь мир зол и среди тысячи едва ли найдешь одного истинного христианина, то люди пожирали бы друг друга, и некому было бы защитить женщин и детей, накормить их и поставить на службу Богу, и мир опустел бы. Вот почему Бог учредил два правления: духовное, которое образуют христиане и благочестивые люди при помощи Святого Духа, во главе с Христом, и светское, сдерживающее нехристиан и злых, заставляющее их, хотя бы против воли, сохранять внешний мир и спокойствие, объясняя необходимость светского меча» [3]. При этом, говоря о нужности светской власти, он подкрепляет свою позицию словами апостола Павла: «Ибо начальствующие страшны не для добрых дел, но для злых» [2, К Римл., 13].

Вместе с этим М. Лютер категорически возражает против сосредоточения светской власти в руках церкви, убедительно аргументируя свою позицию таким образом: «И вот, если бы кто-нибудь захотел править миром по-евангельски, упразднить всякое светское право и светский меч под предлогом, что все не крещеные, все христиане, среди которых Евангелие не предписывает иметь ни права, ни меча, и они вообще не нужны; любезный, угадай, что бы он натворил? Он снял бы путы и цепи с диких, злых зверей, так что они растерзали и перегрызли бы всех, в то же время он уверял бы, будто это – его ручные, безобидные зверюшки; но я почувствовал бы [истину] по ранам своим. Подобно этому стали бы злые под именем христиан пренебрегать евангельской свободой, творить свои бесчинства и утверждать, что они христиане и не подчинены ни мечу, ни закону; ведь уже сейчас некоторые неистовствуют и творят глупости» [3].

Следовательно, разработанная М. Лютером концептуальная модель взаимоотношений двух властей означала радикальное разделение светского и церковного управления, что, по сути, как отмечает К. С. Гаджиев, означало восстановление принципа эрастизма, поскольку светская власть в новых, отличных от средневековой Византии условиях обладала несомненным правом верховенства [4, с. 51]. Это особое положение церкви с необходимостью следовало из идеи суверенитета государства. Очевидно, что ее возникновение стало реакцией на идеал средневековой теократии [4, с. 52].

Но тогда возникает вопрос о статусе церкви в обществе, поскольку она лишалась властных полномочий и влияния на политическую жизнь общества. Ответ в том, что церковная реформа М. Лютера была направлена на превращение «видимой церкви» – церкви как социально-право-

вого института в «невидимую церковь» – церковь как сообщество единоверцев-праведников. В этой церкви лишним становилось духовенство как посредник между Богом и индивидом, лишалась сакрального характера сама церковная традиция.

Дифференциация религии и общества, церкви и государства однако не означает десоциализации верующего человека, скорее наоборот, поскольку жизнь человека в обществе – это прежде всего его деятельность, направленная на искупление первородного греха. Эта деятельность выступает как обязанность отдельного человека, что придает лютеранству рельефно выраженный индивидуалистический характер. Эта *деятельностная* ориентация человека в лютеранстве должна быть официально подкреплена, что находит выражение в его философско-правовой концепции, которая характеризуется следующими положениями: свобода веры по совести – универсальное и равное право всех; правовой защиты заслуживает не только вера, но и ее предпосылки; свобода совести предполагает свободу слова, печати и собраний; право должно реализовываться в неповиновении государственной власти касательно ущемлений свободы совести; правового обеспечения заслуживает лишь духовное, плотское же оставляется на милостивое усмотрение власти [5, с. 102].

Вторая концептуально проработанная модель взаимоотношений светской и духовной власти принадлежит современнику Мартина Лютера **Никколо Макиавелли**, который так же как и родоначальник немецкого протестантизма говорит о доминанте светской власти и не испытывает иллюзий по поводу религиозно-нравственной подоплеки политики государства. В осмыслении им диалектики государства и церкви проявилась двойственность и противоречивость отношения к религии, что, в свою очередь, отразилось на отношении к его творчеству иерархов католической церкви. Поэтому симптоматичен тот факт, что если первые издания «Государя в 1532 г. печатались с одобрения папы Климента VII, то через двадцать лет папа Павел VI осудил автора, а в 1559 г. его работа была внесена в Индекс запрещенных книг» [6, с. 48].

Правда, надо иметь в виду, что на изменении отношения к работе флорентийца сказалась социально-историческая конъюнктура – период правления папы Павла VI относится уже ко времени начала контрреформации.

Для Н. Макиавелли религия ценна прежде всего тем, что является инструментом государственного управления, использование которого способно обеспечивать стабильность общественного развития. Особая роль в достижении этой цели принадлежит религиозному культу как системе отлаженных и имеющих скрытый сакральный характер действий людей. Именно они, особенно «молитвы и весь прочий ритуал богопочитания», по мысли флорентийского мыслителя, являются опорой общественной нравственности и гарантами устойчивости государственного строя. Об этом говорят следующие слова: «Государя или республики, желающие остаться неразвращенными, должны прежде всего уберечь от порчи обряды своей религии и непрестанно поддерживать к ним благоговение, ибо не может быть более очевидного признака гибели страны, нежели явное пренебрежение божественным культом... Поэтому главам республики или царства надобно сохранять основы поддерживающей их религии. Поступая так, им будет легко сохранить государство свое религиозным, а следовательно, добрым и единым. Им надлежит поощрять и умножать все, что возникает на благо религии, даже если сами они считают явления эти обманом и ложью». Завершающая часть фразы говорит о том, что Н. Макиавелли действительно воспринимает религию не как систему знаний (пусть и изотерических), которые могут претендовать на статус истинности. Он воспринимает ее как систему регулятивных норм, имеющих сугубо служебную, вспомогательную роль в управлении делами государства [7].

Говоря о состоянии современного ему государства и сравнивая его с античным государством и местом в нем языческих религий, он отмечает, что его беды во многом производны от неблагополучия в самой папской церкви. В частности, «если бы князья христианской республики сохраняли религию в соответствии с предписаниями, установленными ее основателем, то христианские государства и республики были бы гораздо целостнее и намного счастливее, чем они оказались в наше время. Невозможно представить большего свидетельства упадка религии, нежели указание на то, что народ, находящийся ближе всех к римской Церкви, являющейся главой нашей религии, наименее религиозен. Тот, кто рассмотрит основы нашей религии и посмотрит,

насколько отличны ее нынешние обычаи от стародавних, первоначальных, придет к выводу, что она, несомненно, близка либо к своей гибели, либо к мучительным испытаниям» [7].

Таким образом, первая причина упадка Италии, связанная с деятельностью католической церкви, согласно мыслителю, это то, что «дурные примеры папской курии лишили нашу страну всякого благочестия и всякой религии» [7]. Но есть и вторая причина, она в том, что церковь «держит страну раздробленной» и как результат этого – слабой, завершает свою мысль автор.

Для изменения ситуации к лучшему Н. Макиавелли настаивает на усилении светской власти в обществе, причем соединение религиозного авторитета с политической властью для него неприемлемо. Важно отметить, что для Н. Макиавелли насилие вообще несовместимо с человечностью, следовательно, аморально. Но это не означает, что он исключает принуждение к повиновению, без которого невозможно осуществлять властные функции. Он более технологичен, и средством воздействия на чувства и умы людей для него как раз является религия. Так, по его словам: «Подобно тому, как соблюдение культа божества является причиной величия государств, точно так же пренебрежение этим культом является причиной их гибели. Ибо там, где отсутствует страх перед Богом, неизбежно случается, что царство либо погибает, либо страх перед государем восполняет в нем недостаток религии» [7]. Если у Н. Макиавелли религия фактически рассматривается как средство для обеспечения управления государством, а нормы нравственности как регулятивы деятельности человека, то какими качествами должен обладать человек, наделенный властью? Согласно флорентийскому мыслителю, в них «замечают те или иные качества, заслуживающие похвалы или порицания. А именно: говорят, что один щедр, другой скуп – если взять тосканское слово, ибо жадный на нашем наречии это еще и тот, кто хочет отнять чужое, а скупым мы называем того, кто слишком держится за свое – один расточителен, другой алчен; один жесток, другой сострадатель; один честен, другой вероломен; один изнежен и малодушен, другой тверд духом и смел; этот снисходителен, тот надменен; этот распутен, тот целомудрен; этот лукав, тот прямодушен; этот упрям, тот покладист; этот легкомыслен, тот степенен; этот набожен, тот нечестив и так далее» [8, с. 46].

Как следует из высказывания, набор качеств достаточно широк и размыт, поэтому Н. Макиавелли как прагматик принимает оптимальное решение – «благоразумному государю следует избегать тех пороков, которые могут лишить его государства, от остальных же – воздерживаться по мере сил, но не более» [8, с. 46].

Окончание фразы показательно, так как для Н. Макиавелли не личные качества определяют социальный статус и политический имидж правителя, а его успешные дела на благо государства, а также на сохранение собственного благополучия и безопасности, поскольку от них во многом зависит состояние общества.

Третьей, ставшей знаковой для наступающей новой эпохи – эпохи Нового времени, когда закладываются основания грядущего индустриального общества, стала модель взаимосвязи государства и церкви **Томаса Гоббса**. Английский мыслитель подобно М. Лютеру осознавал неприемлемость для папизма иных, не соответствующих католицизму, религиозных взглядов и их возможную оценку как еретических, но относился к этому с позиций свойственного его философской позиции рационализма.

В частности, он обращает внимание на суть главы «О еретиках», содержащейся в постановлении собора, заседавшего при папе Иннокентии III, когда, как отмечает Т. Гоббс, папская власть достигла своего апогея. Комментарий философа заключается в следующем: «Если какой-нибудь король после предупреждения папы не очистит своего королевства от ересей и, будучи отлучен за это от церкви, не даст удовлетворения в течение года, то его подданные освобождаются от обязанности повиноваться ему, где под ересью подразумеваются все те мнения, которые римская Церковь запретила поддерживать» [9, с. 584–585]. Иными словами, квалификация папством религиозных учений как еретических, с точки зрения английского философа, носит субъективный характер и продиктована социальными интересами.

Т. Гоббс в создании собственного варианта договорной теории происхождения государства активно использует библейские сюжеты, в частности повествование о существовании Царства Божьего, которое было создано Богом по соглашению с народом Израиля, но затем нарушено за

его грехи. После искупительной жертвы Иисуса Христа возникает необходимость в восстановлении условий договора Бога с людьми, результатом которого становится Царство Божье. Важна артикуляция философом мысли, что Царство Божье «является реальным царством, а не метафорическим, и так оно понимается не только в Ветхом Завете, но и в Новом Завете. Когда мы говорим «ибо тебе принадлежит царство, могущество и слава», то следует подразумевать царство бога в силу нашего завета, а не по праву могущества бога, ибо такого рода царство бог всегда имеет, так что было бы излишне говорить в нашей молитве «да придет царство твое», если мы не подразумеваем под этим восстановлением Христом того Царства Божьего, которое было прервано бунтом израильтян при избрании ими Саула» [9, с. 415]. Из данного высказывания следует договорной (не только между Богом и людьми, но прежде всего между людьми) характер организации общественных отношений в христианском обществе, конкретно-исторический характер договора (ветхозаветный и новозаветный его этапы), а также социально-политический смысл общественного договора, результатом которого стало учреждение государства.

Следовательно, наряду с религиозно-духовной властью, локализованной в институте церкви, возникает светская власть, основным субъектом которой выступает государство. Рассмотрение их взаимосвязи и становится темой анализа мыслителя. Из специфики толкования договорной концепции вытекает, что коль Христос, подобно Богу-Отцу, не участвует в заключении договора, а восстанавливает его, то Гоббс приходит к выводу, что Христос является только представителем Бога на земле, а его царство не означает Царство Божье. Об этой позиции недвусмысленно говорят следующие слова: «...наш спаситель... представляет (подобно Моисею) личность бога. И лишь начиная с того времени, но не раньше бог называется отцом, и, оставаясь одной и той же субстанцией, он является одним лицом, поскольку он представлен Моисеем, и другим лицом, поскольку он представлен своим сыном Христом. Ибо понятие лицо соотносительно понятию представитель, и, следовательно, при наличии многих представителей имеется много лиц, хотя одной и той же субстанции» [9, с. 481].

Эта трактовка одного из догматов христианской религии – догмата святой троицы, близкая к антитринитаризму, не случайна, поскольку соответствует обоснованию философом приоритета светской власти в общественной жизни и дискредитации претензий церкви. В этом обосновании он использует несколько аргументов. Во-первых, Т. Гоббс обращается к истории, говоря, что у древних греков слово «церковь» по смыслу совпадает со словом «экклезия», понимаемом как собрание граждан, созданное в келью выслушать должностное лицо.

Во-вторых, следуя такому пониманию церкви, он апеллирует к многообразию национальных церквей как контраргументу всевластия папства. Суть его в следующем: «Отсюда нет на земле такой универсальной церкви, которой все христиане были бы обязаны повиноваться, так как нет такой власти на земле, по отношению к которой все другие государства были бы подданными» [9, с. 461].

В-третьих, английский философ крайне негативно относится к идее разделения властей, осознавая ее связь с учением о божественной троице и считая ее несовместимой с суверенитетом государственной власти, поскольку она может провоцировать возврат к ситуации «войны всех против всех». По этому поводу он пишет: «Имеется шестое учение, ясно и прямо направленное против сущности государства. Оно гласит: верховная власть неделима. Ибо делить власть государства – значит разрушать ее, так как разделенные власти взаимно уничтожают друг друга» [9, с. 339].

Что же касается приоритета общественного управления, то в этом вопросе Т. Гоббс выступает как противник дуализма светской и духовной властей, предостерегая от негативных последствий их конкуренции. Ход его размышлений следующий: «А если имеется лишь одно царство, тогда или *гражданская власть*, которая есть власть государства, должна быть подчинена *духовной*, и тогда имеется лишь *духовный* суверенитет, или же *духовная власть* должна быть подчинена *светской власти*, и тогда имеется лишь *светское верховенство*. Поэтому, когда эти две власти противостоят друг другу, государство подвергается большой опасности гражданской войны и распада...» [9, с. 341].

Таким образом, Томас Гоббс – яркий представитель новоевропейского *этатизма* – настаивает на жизненной необходимости единства государства, в обеспечении которого ведущую роль

играют мораль и право, практически совпадающие, но их статус в государстве, тем не менее, не одинаков. Об этом можно судить по его словам: «...ясно, что мерилом добра и зла является гражданский закон, а судьей – законодатель, который всегда представляет государство» [9, с. 336]. Отмеченное различие статусов права и морали в том, что мораль неинституциональна, а под правом философ понимает не тесно связанное с моралью естественное право, а позитивное право, имеющее формально-рациональный характер, а потому представленное в форме юридического акта, закона, исполнение которого опирается на силу государства. Поэтому есть резон в том, что Гоббса считают правозвестником современного правового позитивизма [5, с. 79]. Следует отметить еще одну особенность взглядов Т. Гоббса, которая свидетельствует о его близости к античному этицизму. Так, считая, что члены общества, обязавшись по общественному договору повиноваться монарху, не могут без его разрешения изменять форму правления, даже осуждать его действия, тем не менее Т. Гоббс говорил о приоритете в его правлении не интересов государя, а интересов народа. Интересно сопоставить его позицию с позицией современника Т. Гоббса Г. Гроция, одного из основоположников правоведения Нового времени. У Г. Гроция иная позиция [10], вызвавшая критику Ж. Ж. Руссо. В частности, французский философ-просветитель отмечает, что Г. Гроций «отрицает, что у людей всякая власть устанавливается для пользы управляемых... Этот философ утверждал, что положение о решающей роли интересов подданных при установлении власти не является всеобщей истиной, поскольку некоторые правительства сами по себе существуют ради правителя, как, например, правление хозяина, при котором польза раба чужда и случайна для хозяйства» [11].

Следовательно, если Г. Гроций, как и многие его современники, например Н. Макиавелли, следовал духу своего прагматичного времени и, используя выражение М. Вебера, воспринимал общество в «расколдованном виде», то Т. Гоббс в этом вопросе наследовал убеждения Аристотеля о государстве как выразителе общественных интересов. Эти взгляды английского философа объяснимы в контексте концепции общественного договора, поскольку гражданский мир (а это одно из основных условий его соблюдения) может сохраняться только в случае удовлетворения интересов народа.

Четвертая модель взаимоотношений светской и духовной власти государства и церкви была предложена видным представителем философии французского просвещения **Жаном Жаком Руссо**, разработавшим подобно Т. Гоббсу оригинальный вариант концепции общественного договора. Общими у Ж. Ж. Руссо и Т. Гоббса были, по крайней мере, две методологические установки. Во-первых, признание важной (хотя и неоднозначной) роли религии в возникновении и становлении государства. Об этом у Ж. Ж. Руссо сказано недвусмысленно: «Ни одно государство не было основано без того, чтобы религия не послужила для него основанием» [11].

Во-вторых, общим было признание жизненной необходимости для общества социально-политического союза этих видов власти. Ж. Ж. Руссо эту установку излагает взвешенно и объективно: «Из всех христианских авторов философ Т. Гоббс – единственный, кто хорошо видел и зло, и средство его устранения, кто осмелился предложить соединить обе главы орла и привести все к политическому единству, без которого ни Государство, ни Правление никогда не будут иметь хорошего устройства. Но он должен был видеть, что властолюбивый дух христианства несовместим с его системой и что интересы священника будут всегда сильнее, чем интересы Государства. Не столько то, что есть ужасного и ложного в политических воззрениях Т. Гоббса, как то, что в них есть справедливого и истинного, и сделало их ненавистными» [11]. Проблема, которую вслед за Т. Гоббсом хорошо осознает Ж. Ж. Руссо, но с этицистским решением которой он не согласен, становится для него актуальной. Для более глубокого ее рассмотрения он обращается к истории религии, в частности к периоду религии древнегреческого полиса, когда, по его мнению, такое единство существовало. Но что касается истории христианских государств, то здесь философ приходит к неутешительному выводу: возвращение к античному идеалу такого единства не представляется возможным. Основная причина этого – в стремлении к узурпации власти духовенством, превратившимся в социальную корпорацию, настаивающую на собственном суверенитете: «Дух христианства заполнил все. Религия так и осталась или вновь сделалась независимой от суверена и утратила необходимую связь с организмом Государства» [11].

Существующие религии Ж. Ж. Руссо разделяет на два основных вида – религию человека и религию гражданина. Первая – «религия без храмов», ограниченная внутреннею верою во всевышнего Бога и вечными обязанностями морали. Такова, по его мнению, «чистая и простая религия Евангелия, истинный теизм». Вторая религия – религия, которая введена только в одной стране, в которой культивируются свои боги и почитаются свои покровители, а ее догматы и культ опираются на предписанные законы. Таковы были все религии первых народов. Правда, отмечает философ, есть еще третий род религии – «религия, давая людям два законодательства, двух правителей, два отечества, налагает на них взаимоисключающие обязанности и мешает им быть одновременно набожными и гражданами». Таково римское христианство, которое он называет «религией священнической» [11].

По оценке Ж. Ж. Руссо, с политической точки зрения все эти религии имеют недостатки, особенно это относится к третьей религии, поскольку она способствует нарушению единства общества и ведет к противоречию человека с самим собой. Здесь Ж. Ж. Руссо имеет в виду «раздвоенность индивида», обусловленную его приверженностью как ценностям «религии человека», так и ценностям «религии гражданина», что в конечном счете ведет к его отчуждению от тех и других. Вообще мыслитель, отмечая некоторые достоинства политической религии, считает, что ее не надо возрождать, поскольку она основана на обмане. При этом он имеет в виду католическое христианство, но это касается и евангелического христианства, правда, по другой причине – не имея отношения к «политическому организму», эта религия «не только не привязывает души граждан к Государству, она отрывает их от него, как и от всего земного» [11]. Следовательно, протестантизм, а конкретно кальвинизм, не способствует социализации человека.

Ставя перед собой задачу выработки системы идей, которые должны способствовать укреплению государства, причем которые воспринимались бы подданными на веру и не требовали обоснования рациональными средствами, Ж. Ж. Руссо разрабатывает «гражданскую религию». Ориентируясь на «чувства общественности», он стремится синтезировать компоненты «религии человека» и «религии гражданина», а основой для этого синтеза у него выступают положения, возведенные в ранг догм гражданской религии. При этом, по убеждению французского мыслителя, «догматы гражданской религии должны быть просты, немногочисленны, выражены точно, без разъяснений и комментариев. Существование Божества могущественного, разумного, благодетельного, предусмотрительного и заботливого; загробная жизнь, счастье праведных, наказание злых, святость Общественного договора и законов – вот догматы положительные. Что касается отрицательных догматов, то я ограничусь одним-единственным: это нетерпимость» [11].

Обращает на себя внимание последний, «отрицательный догмат», имеющий императивный характер и свидетельствующий о некоторых особенностях «гражданской религии». Во-первых, о том, что она не претендует на признание себя единственно правильной, коль допускает существование других религий. Во-вторых, что она не претендует на статус обладания истиной, ибо тогда она предполагала бы рациональное отношение к явлениям действительности, а на самом деле она обращена к «чувству общественности». В-третьих, что она имеет сугубо функциональное назначение, заключающееся в политическом воспитании человека, особенно важного в процессе генезиса нации: «при рождении нации религия служит орудием политики» [11]. Иными словами, согласно Ж. Ж. Руссо, ценность религии для государства должна состоять в эффективности культивирования и поддержания в обществе гражданских добродетелей в интересах представителей всех сословий. Взгляды мыслителя характеризуют как проявления новоевропейского эгалитаризма, а его философию рассматривают как один из теоретических источников социал-демократического движения.

Пятая концептуально проработанная модель взаимоотношений светской и духовной власти, государства и церкви представлена в творчестве **Джона Локка**, которого по праву считают родоначальником классического либерализма. Для английского философа, как это представлено в его версии теории общественного договора, интересы общества приоритетны по сравнению с интересами государства, и именно правительство является обязательным участником договора, принимая на себя ответственность за осуществляемую политику. Если же эта политика будет несостоятельной, то общество вправе свергнуть его и заключить договор с новым правительством.

Дж. Локк отдает себе отчет в той важной роли, которую играет в обществе духовная власть церкви, но в определении ее компетенции он категоричен. По его словам, «здесь не место вы-

яснять происхождение духовной власти или авторитета; но я все же хочу сказать следующее: каково бы ни было происхождение этой власти, поскольку она церковная, она и должна быть ограничена пределами церкви и никоим образом не может распространяться на дела гражданские, поскольку сама церковь полностью и совершенно отделена от государства и гражданских дел. Пределы и для той, и для другого твердо установлены и нерушимы. Смешивать два этих совершенно различных по своему происхождению, цели и предмету сообщества – все равно что смешивать столь несовместимейшие вещи, как небо и земля» [12, с. 103].

Из сказанного следует вывод, что Дж. Локк является непримиримым противником вмешательства церкви в дела гражданского общества и государства. Но и государство не должно вмешиваться в дела церкви, и тем более в процедуры церковного исповедания. Он обращает внимание на прерогативы государства в обществе. В частности, по его мнению, государство – это общество людей, созданное с единственной, но стратегической целью – «сохранения и приумножения гражданских благ», в числе которых он называет «жизнь, свободу, телесное здоровье и отсутствие физических страданий, владение внешними вещами, такими, как земли, деньги, утварь и т. д.» [12, с. 103].

Дж. Локк подчеркивает, что юрисдикция правителя распространяется исключительно на эти блага и никак не может касаться «заботы о спасении души».

Для английского мыслителя разделение сфер влияния светской и духовной власти оказывается настолько принципиальным, что он выдвигает и подробно останавливается на трех основных аргументах, которые достаточно убедительны в ограничении претензий гражданского правителя на его вмешательство в сферу религиозной жизни. В итоге рассуждений Дж. Локк делает вывод: «Прежде всего я считаю необходимым различать вопросы государственные и религиозные и должным образом определить границы между церковью и государством... Но одно дело – убеждать, другое – приказывать, первое требует аргументов, второе – повелений. Из них второе – дело гражданской власти, первое же – человеческого доброжелательства» [12, с. 103].

Поскольку церковь оказывается отделенной от государства, то она становится важным структурным элементом гражданского общества и, следовательно, должна руководствоваться характерными для него нормативными принципами. Таким принципом, который Дж. Локк определяет как основной критерий истинной церкви, для него является принцип взаимной веротерпимости христиан. При этом у Дж. Локка речь идет об «истинной» религии, которая, как можно сделать вывод, отлична от католичества с характерной для него богатой атрибутикой и культом. По словам философа, «истинную религию, рожденную не для внешнего великолепия, не ради господства церкви, не для насилия, наконец, но для правого и благочестивого устройства жизни, отличает совсем иное. Тот, кто хотел бы сражаться в рядах церкви Христовой, должен прежде всего объявить войну своим порокам, собственному высокомерию и страстям; в противном случае если лишен он святости жизни, чистоты нравов, доброты и мягкости душевной, то не заслуживает имени христианина» [12, с. 103].

Не сила, а доброта, вера, любовь, подводит итог Дж. Локк, являются тем, что позволяет евангелической церкви укреплять единство общества, формируя в нем демократические порядки и способствуя взаимопониманию как людей, принадлежащих к разным вероисповеданиям, так и церкви и государства. Для Дж. Локка, как и для философии либерализма в целом, ограничение влияния государства и церкви на человека является условием понимания им ценности себя как индивидуума и осознания ответственности за собственные действия.

**Заключение.** Таким образом, для обоснования современной модели диалога церкви и государства в контексте глобализационных процессов представляется значимым и важным тот социальный опыт их взаимодействия, который накоплен на протяжении столетий в цивилизационной динамике христианства.

#### Список использованных источников

1. Никонов, В. А. Код цивилизации. Что ждет Россию в мире будущего? / В. А. Никонов. – М.: Издательство «Э», 2015. – 672 с.
2. Библия. Книги Священного Писания Ветхого и Нового Заветов. – Минск: Белорусский Экзархат Московского Патриархата, 2015. – 1520 с.

3. Лютер, М. О светской власти [Электронный ресурс] / М. Лютер // Mreadz.com. – Режим доступа: <http://mreadz.com/read-122317>. – Дата доступа: 03.05.2018.
4. Гаджиев, К. С. Политическая философия / К. С. Гаджиев. – М.: Экономика, 1999. – 605 с.
5. Философия права / О. Г. Данильян [и др.]. – М.: Эксмо, 2005. – 416 с.
6. Юсим, М. А. Этика Макиавелли / М. А. Юсим; отв. ред. В. И. Рутенбург. – М.: Наука, 1990. – 155 с.
7. Макиавелли, Н. Рассуждения о первой декаде Тита Ливия [Электронный ресурс] / Н. Макиавелли. – Режим доступа: <http://lib.ru/POLITOLOG/MAKIAWELLI/livij.txt>. – Дата доступа: 03.05.2018.
8. Макиавелли, Н. Государь / Н. Макиавелли. – М.: Планета, 1990. – 80 с.
9. Гоббс, Т. Избранные произведения: в 2 т. / Т. Гоббс. – М.: Мысль, 1964. – Т. 2. – 748 с.
10. Гроций, Г. О праве войны и мира: Три книги, в которых объясняются естеств. право и право народов, а также принципы публичного права / Г. Гроций; пер. с латин. А. Л. Саккетти. – М.: Госюриздат, 1956. – 868 с.
11. Руссо, Ж. Ж. Об Общественном договоре, или Принципы политического Права. Комментарии [Электронный ресурс] / Ж. Ж. Руссо. – Режим доступа: <http://e-libra.ru/read/125691-ob-obshhestvennom-dogovore-ili-principy-politicheskogo-prava.html>. – Дата доступа: 03.05.2018.
12. Локк, Дж. Сочинения: в 3 т. / ред. И. С. Нарский, А. Л. Субботин. – М.: Мысль, 1986–1988. – Т. 3. – 668 с.

### References

1. Nikonov V. A. *Code of Civilization. What awaits Russia in world of future?* Moscow, Publisher «Е», 2015. 672 p. (in Russian).
2. *Bible. Scriptures of the Old and New Testaments*. Minsk, Belarusian Exarchate of the Moscow Patriarchate, 2015. 1520 p. (in Russian).
3. Luther M. *On secular power*. Available at: <http://mreadz.com/read-122317> (accessed 3 May 2018) (in Russian).
4. Gadzhiev K. S. *Political Philosophy*. Moscow, Ekonomika Publ., 1999. 605 p. (in Russian).
5. Danil'yan O. G., Bairachnaya L. D., Maksimov S. I. (et al.) *Philosophy of law*. Moscow, Eksmo Publ., 2005. 416 p. (in Russian).
6. Yusim M. A., Rutenburg V. I., ed. *Ethics of Machiavelli*. Moscow, Nauka Publ., 1990. 155 p. (in Russian).
7. Machiavelli N. *Discourses on First Ten Books of Titus Livy*. Available at: <http://lib.ru/POLITOLOG/MAKIAWELLI/livij.txt> (accessed 3 May 2018) (in Russian).
8. Machiavelli N. *Prince*. Moscow, Planeta, 1990. 80 p. (in Russian).
9. Hobbes T. *Selected works. Vol. 2*. Moscow, Mysl' Publ., 1964. 748 p. (in Russian).
10. Grotius G. *On Right of War and Peace*. Moscow, Gosyurizdat Publ., 1956. 868 p. (in Russian).
11. Rousseau J.-J. *Social Contract, or Principles of Political Right. Comments*. Available at: <http://e-libra.ru/read/125691-ob-obshhestvennom-dogovore-ili-principy-politicheskogo-prava.html> (accessed 3 May 2018) (in Russian).
12. Lock J. *Works. Vol. 3*. Moscow, Mysl' Publ., 1988. 668 p. (in Russian).

### Информация об авторе

Щёкин Николай Сергеевич – канд. филос. наук, доцент, руководитель центра. Институт социологии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 1/2, 220072, Минск, Республика Беларусь).

### Information about the author

Shchyokin Nikolai Sergeevich – Ph. D. (Philosophy), Associate Professor, Head of the Center. Institute of Sociology of the National Academy of Sciences of Belarus (1/2, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

**АГРАРНЫЕ НАУКИ****AGRARIAN SCIENCES**

УДК 636.7.082.265

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-504-512>

Поступило в редакцию 10.05.2018

Received 10.05.2018

**Академик И. П. Шейко, член-корреспондент Р. И. Шейко***Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству,  
Жодино, Республика Беларусь***МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ БЕЛОРУССКОГО ЖИВОТНОВОДСТВА**

**Аннотация.** Осуществляемые в последние годы мероприятия по повышению продуктивных качеств сельскохозяйственных животных позволили обеспечить производство в 2017 г. всеми категориями хозяйств более 7,0 млн т молока и 1726 тыс. т мяса. В расчете на душу населения в республике произведено 760 кг молока и 130 кг мяса.

На период до 2025 г. в животноводстве Беларуси основное 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 молочных коров в республике при общей численности крупного рогатого скота 4,3–4,5 млн гол. должно находиться примерно на уровне 1,5–1,6 млн гол. Поголовье свиней должно несколько возрасти и составить к 2025 г. 3,3–3,6 млн гол. Нарращивание поголовья птицы не планируется, оно останется на уровне 49,5 млрд гол.

Учитывая, что генетический фонд сельскохозяйственных животных является национальным богатством страны, необходимо, используя рыночные механизмы, создать для предприятий племенного дела (особенно племзаводов) режим наибольшего благоприятствования. Таких предприятий немного, и государство могло бы это реализовать, обеспечив будущее белорусского животноводства.

**Ключевые слова:** сельскохозяйственные животные, повышение племенных и продуктивных качеств, производство молока и мяса, поголовье, генетический фонд

**Для цитирования:** Шейко, И. П. Модели развития белорусского животноводства / И. П. Шейко, Р. И. Шейко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 504–512. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-504-512>

**Academician Ivan P. Sheyko, Corresponding Member Ruslan I. Sheyko***Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry,  
Zhodino, Republic of Belarus***DEVELOPMENT MODELS OF BELARUSIAN LIVESTOCK BREEDING**

**Abstract.** The measures taken in the recent years to improve performance traits of farm animals allowed one to ensure the production of more than 7.0 million tons of milk and 1726 thousand tons of meat on all-category farms in 2017. 760 kg of milk and 130 kg of meat were produced per capita in the Republic.

For the period up to 2025, main attention should be paid to the application of resource-saving technologies and the latest scientific developments and improvements of the resource potential of the industry in the livestock breeding of Belarus. Priority should be given to the implementation of innovative technologies and improvement of breeding work.

The perfect number of dairy cows in the country with a total cattle number of 4.3–4.5 millions of farm animals should be at a level of approx. 1.5–1.6 million of farm animals. The pig livestock will slightly increase and will amount to 3.3–3.6 millions of farm animals by 2025. The increase in the number of the poultry livestock is not planned and it will remain at a level of 49.5 billions.

Taking into account that the genetic pool of farm animals is the national wealth of the country and using market mechanisms, it is necessary to create the most favorable conditions for breeding enterprises (especially breeding farms). There are few such enterprises, and the state could realize this to ensure the future of the Belarusian livestock.

**Keywords:** farm animals, improvement of breeding and performance traits, milk and meat production, livestock, genetic pool

**For citation:** Sheiko I. P., Sheiko R. I. Development models of belarusian livestock breeding. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 504–512 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-504-512>

**Введение.** Проблема обеспечения населения разнообразными высококачественными и полноценными продуктами питания является интернациональной. Еще в 70-е годы XX в. на специальном заседании ФАО/ВОЗ ведущие эксперты мира сформулировали десять глобальных задач, которые человечеству предстоит решить в ближайшей перспективе. Одна из важнейших – проблема дефицита продуктов питания. Согласно научно обоснованным нормам, ежегодное потребление молока и молочных продуктов должно составлять 400 кг, мясных продуктов – не менее 85 кг на душу населения. Как свидетельствует практика развитых стран, интенсивное развитие отраслей животноводства позволяет в значительной мере выполнить поставленные задачи [1].

Для Беларуси высокоразвитое животноводство является основой обеспечения продовольственной безопасности страны, так как в этой отрасли производится более 60 % стоимости валовой продукции сельского хозяйства и от ее эффективной работы во многом зависит экономическое благополучие большинства сельскохозяйственных организаций республики [2].

Осуществляемые в течение последних лет мероприятия по повышению продуктивных качеств сельскохозяйственных животных позволили обеспечить производство в 2017 г. всеми категориями хозяйств более 7,0 млн т молока, 1726 тыс. т мяса скота и птицы в убойном весе. Эти объемы производства животноводческой продукции обеспечивают внутренние потребности республики и экспортный потенциал. Как свидетельствует анализ, в последние 5–7 лет около 60 % произведенного в стране молока и около 30 % мяса поставляется на внешний рынок [3].

**Результаты и их обсуждение.** В настоящее время животноводство в стране располагает достаточно высоким генетическим потенциалом: удой на корову находится на уровне 8,5–9,0 тыс. кг молока за лактацию, среднесуточный прирост бычков на откорме – 1350–1500 г, свиней-гибридов – 900–1000 г, что позволяет производить конкурентоспособную продукцию.

Реализация селекционных проектов в рамках республиканских комплексных программ позволила завершить работу по выведению новых конкурентоспособных пород и типов сельскохозяйственных животных: белорусской мясной породы свиней, белорусской черно-пестрой породы крупного рогатого скота, белорусской упряжной породы лошадей, заводского типа свиней крупной белой породы «Заднепровский», белорусской крупно-белой породы свиней, заводского и внутривидового типов в породе дюрок, заводского типа «Березинский» в белорусской мясной породе [5].

Новые селекционные достижения в животноводстве (породы, типы, линии) являются не только средством производства высококачественной продукции животноводства, но и достоянием отрасли. Подтверждение этого – животные белорусской мясной породы свиней, вошедшие в государственный реестр научных разработок и составляющие национальное достояние республики.

Селекционно-племенная работа имеет и будет иметь в перспективе ключевое значение в технологическом развитии всего животноводства. Опыт завоза животных импортных пород показал недостатки этой практики – прежде всего они не адаптированы к местным условиям содержания и ветеринарным нормам, что в лучшем случае не позволяет реализовать их потенциал, а в худшем они быстро выбывают из воспроизводства. Известны случаи, когда под маркой племенных животных завозились высокопродуктивные товарные гибриды, не способные передать свои качества потомству. Негативными предпосылками использования импортных животных является также отсутствие четкой нормативно-правовой базы, высокая стоимость, а также сложившаяся в настоящее время мировая политическая конъюнктура. В то же время закупки племенных животных за рубежом носят вынужденный характер и вызваны в первую очередь ветеринарными проблемами, особенно в свиноводстве [6].

Все это обуславливает актуальность резкого повышения качества отечественной племенной работы и ее интенсификация различными методами.

На период до 2025 года в животноводстве основное внимание должно быть уделено использованию ресурсосберегающих технологий и новейших научных разработок, оптимизации ре-

сурсного потенциала отрасли. Приоритет должен быть отдан внедрению инновационных технологий и совершенствованию селекционной работы.

Оптимальное поголовье молочных коров в Беларуси при общей численности крупного рогатого скота 4,3–4,5 млн голов должно находиться примерно на уровне 1,5–1,6 млн голов (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Прогнозируемые показатели численности сельскохозяйственных животных и птицы в Беларуси (в хозяйствах всех категорий)

Table 1. Predicted indicators of the number of farm animals and poultry in Belarus (on all-category farms)

Год Year	Поголовье крупного рогатого скота, тыс. гол. Number of cattle, thousand goals	Поголовье коров, тыс. гол. Number of cows, thousand goals	Поголовье свиней, тыс. гол. Number of pigs, thousand goals	Поголовье птицы, млн гол. Number of poultry, million goals
2017 (факт)	4302,4	1503,2	3152,0	49516,1
2018	4330	1510	3170	49500
2019	4350	1520	3200	49500
2020	4370	1530	3250	49500
2021	4390	1540	3300	49500
2022	4410	1550	3450	49500
2023	4430	1555	3500	49500
2024	4450	1560	3550	49500
2025	4470	1570	3600	49500

Поголовье свиней должно несколько возрасти и составить к 2025 г. 3,3–3,6 млн голов. Нарращивания поголовья птицы не планируется. Оно останется на уровне 49,5 млрд голов.

В 2017 г. надой на корову в республике наконец-то превзошел 5-тысячный рубеж. Среднесуточный прирост крупного рогатого скота составил 590 г, свиней также 590 г, яйценоскость кур-несушек – 280 яиц. Для страны с высокоразвитой отраслью животноводства эти показатели не могут оцениваться положительно. Следует отметить, что генетический потенциал в молочном скотоводстве реализуется на уровне 50–55 %, среднесуточные приросты крупного рогатого скота и свиней – 55–60 %, яйценоскость кур – на 85 %. В связи с этим программой развития отраслей животноводства предусматривается довести к 2025 г. годовой удой на корову до 6,5 тыс. кг, получить среднесуточный прирост молодняка на выращивании и откорме до 850 г, свиней – 720 г, яйценоскость кур-несушек довести до 320 яиц за год (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Прогнозируемые показатели продуктивности сельскохозяйственных животных и птицы в Беларуси (в хозяйствах всех категорий)

Table 2. Predicted indicators of the productivity of farm animals and poultry in Belarus (on all-category farms)

Год Year	Надой молока на 1 корову в год, кг Milk yield per cow per year, kg	Среднесуточный прирост, г Average daily gain, g		Средняя яйценоскость кур-несушек, шт. за год Average egg laying of laying hens, pcs. in a year
		крупного рогатого скота cattle	свиней pigs	
2017 (факт)	5005	590	590	280
<i>Прогноз</i>				
2018	5200	650	620	285
2019	5400	670	630	290
2020	5600	700	650	300
2021	5700	720	670	305
2022	5800	740	680	310
2023	6000	760	690	312
2024	6300	780	700	315
2025	6500	850	720	320

Выполнение прогнозных показателей продуктивных качеств сельскохозяйственных животных позволит к 2025 г. существенно увеличить валовое производство молока, мяса и яиц в республике (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Прогнозируемые показатели валового производства животноводческой продукции в Беларуси (в хозяйствах всех категорий)

T a b l e 3. Predicted indicators of the gross production of livestock products in Belarus (on all-category farms)

Год Year	Молоко, тыс. т Milk, thousand tons	Продукция выращивания, тыс. т Production of cultivation, thousand tons				Яйца, млрд шт. Eggs, billion pcs.
		всего Total	крупный рогатый скот Cattle	свиней pigs	птицы Poultry	
2017 (факт)	6989,3	1829,3	642,0	523,1	659,2	3665,1
2018	7450	1910	710	540	660	3668
2019	7800	1950	728	560	662	3669
2020	8500	2000	770	565	665	3670
2021	8800	2100	840	580	670	3670
2022	9200	2150	875	590	685	3671
2023	9400	2200	910	600	690	3671
2024	9600	2250	920	610	720	3672
2025	9800	2310	930	650	730	3672

Учитывая, что Беларусь уже полностью и стабильно обеспечивает себя продукцией животноводства, все полученное в последующие годы и молоко, и мясо будут поставляться на экспорт ближнего и дальнего зарубежья. Анализируя данные, следует отметить, что из основных видов продукции животноводства наибольший рост к 2025 г. придется на производство молока (более 1,5 млн т) и составит около 9,7–10,0 млн т. Примерно на 450–480 тыс. т планируется увеличить производство мяса. Производство яиц останется на достигнутом уровне (около 3 млрд 670 млн штук).

Рентабельность животноводческих предприятий в наибольшей степени зависит от расхода кормов на единицу продукции. Анализ данных в табл. 4 свидетельствует, что к 2025 г. при существенном улучшении качества кормов, расход их на 1 ц молока составит 0,8 ц корм. ед. (80–82 ЭКЕ), на 1 ц прироста крупного рогатого скота – 7,8 ц корм. ед. (750–800 ЭКЕ) и на 1 ц прироста свиней – 3,2 корм. ед. (350–370 ЭКЕ). Указанные показатели уже достигнуты лучшими животноводческими предприятиями Республики Беларусь.

Т а б л и ц а 4. Расход кормов на единицу продукции животноводства в прогнозируемый период в сельскохозяйственных предприятиях, ц корм. ед.

T a b l e 4. Feed consumption per unit of product of animal husbandry during the predicted period on animal farms, centner fodder units

Год Year	Расход кормов на 1 ц молока Feed consumption per 1 centner of milk	Расход кормов на 1 ц прироста крупного рогатого скота Feed consumption per 1 cent of cattle increment	Расход кормов на 1 ц прироста свиней Feed consumption per 1 cent of pig growth
2017 (факт)	1,0	10,8	5,0
2018	0,99	10,6	4,8
2019	0,97	10,0	4,5
2020	0,95	9,5	4,3
2021	0,93	9,0	4,2
2022	0,90	8,6	3,9
2023	0,88	8,3	3,7
2024	0,85	8,0	3,4
2025	0,80	7,8	3,2

Как отмечалось выше, прогнозируемый уровень производства молока в Республике Беларусь будет поддерживаться за счет направленной селекционной работы по повышению племенных и продуктивных качеств молочного стада коров.

Однако хорошо известно, что высокопродуктивные животные требуют и особого внимания к качеству кормов и полноценному кормлению. В связи с этим нормы кормления высокопродуктивных коров существенно отличаются от низко- и среднепродуктивных (табл. 5).

Т а б л и ц а 5. Нормативы концентрации основных питательных веществ в 1 кг сухого вещества рациона в зависимости от продуктивности молочных коров

Table 5. Concentration norms of main nutrients per 1 kg of dry substance of ration depending on the productivity of dairy cows

Показатель Index	Надой молока на корову в год, ц Milk yield per cow per year, centners		
	40–50	55–60	70–80
Энергетические кормовые единицы (ЭКЕ)	0,97–0,98	1,00–1,10	1,11–1,13
Сырой протеин, г	136–140	146–160	162–172
Переваримый протеин, г	90–92	95–106	107–112
Крахмал, г	86–102	103–115	130–150
Сахар, г	78–82	85–96	100–115
Клетчатка, г	250–240	230–220	210–200
Кальций, г	7,4–8,1	8,2–9,4	9,5–9,8
Фосфор, г	4,3–4,6	4,7–5,5	5,6–6,0
Каротин, мг	38–42	43–52	55–60
Витамин Д, МЕ	920–938	940–1048	1150–1200

С ростом продуктивности молочного скота закономерно снижаются затраты кормов (ЭКЕ) на единицу продукции. Так, если при продуктивности 55–60 ц молока от коровы в год норматив затрат кормов на 1 кг молока составляет 1,0–1,1 ЭКЕ, то при прогнозируемой продуктивности 70–80 ц молока он не должен превышать 0,75–0,80 ЭКЕ.

Главная цель селекционно-племенной работы в молочном скотоводстве на нынешнюю и последующую пятилетки заключается в дальнейшем повышении генетического потенциала молочного скота белорусской черно-пестрой породы до уровня 10–12 тыс. кг молока с содержанием жира 3,6–3,9 % и белка 3,2–3,3 % и более. И это вполне реальная задача.

В настоящее время ученые НППЦ НАН Беларуси по животноводству освоили новую методику оценки племенной ценности скота, ДНК-технологии и ряд биотехнологических приемов и методов, позволяющих в 1,5–2,0 раза ускорить темпы селекции.

С экономической точки зрения производство молока является более выгодным по сравнению с другими видами животноводческой продукции. Если затраты кормов на получение 1 тыс. ккал в молоке составляют 1,4 к. ед., то на такое же количество энергии, содержащейся в говядине, надо затратить в 5,4 раза больше кормов, в свинине – в 2,5 и в мясе птицы – в 1,9 раза, поэтому молочное скотоводство должно быть приоритетной отраслью в республике и от его состояния во многом будет зависеть экономическое благополучие сельскохозяйственных организаций республики.

Главный сдерживающий фактор интенсификации животноводства – плохое качество кормов, низкая концентрация продуктивной энергии в сухом веществе. До последнего времени делался акцент на поддерживающий корм, а не на продуктивный. Для доведения энергии в 1 кг сухого вещества рациона до 0,80–0,85 к. ед. необходимо пересмотреть приоритеты аграрного сектора, сориентировав их на нужды животноводства. Земледелие должно быть направлено на производство полноценных кормов, особенно травяных.

Предстоит в 1,7–2,0 раза увеличить производство зеленых кормов не только для заготовки качественного сенажа, силоса и сена, но и для обеспечения ими животных в летний пастбищный период. Для этого у нас появилась хорошая кормоуборочная техника, позволяющая готовить высококлассные корма, в том числе и кукурузный силос. Нужна государственная поддержка в приобретении хозяйствами этой техники, а также в реконструкции и улучшении пастбищ. Затраты, требуемые на это, в 3–4 раза меньше, чем на интенсификацию производства зерна.

Не менее важной причиной экстенсивности отрасли является хронический дефицит кормового белка в рационах, а это целиком связано со структурой полевого кормопроизводства, где традиционно в течение длительного времени недостаточно производилось белковых кормов (зернобобовых, масличных), несмотря на то что изучена потребность всех видов животных в питательных веществах и белке при всех физиологических состояниях.

Следует понять, что без решения этих задач невозможно создать эффективное конкурентоспособное отечественное животноводство. Альтернативы здесь нет. Только при обеспечении животных полноценным рационом – главным фактором эффективности и конкурентоспособности отрасли – можно определить такой полностью зависимый от уровня продуктивности показатель, как численность животных. В современных условиях абсолютный приоритет должен быть отдан увеличению продуктивности животных, а не росту их численности.

В настоящее время постоянно ставится вопрос о том, кто будет главным производителем продуктов животноводства – мелкие или крупные фермы. Существует мнение о перспективности фермерских хозяйств. Однако анализ нашего отечественного и мирового опыта показывает, что магистральное направление в производстве животноводческой продукции будет за крупными комплексно-механизированными и автоматизированными фермами. Только там есть условия для реализации новых эффективных технологий и, что не менее важно, там могут быть созданы наиболее благоприятные условия и для работников животноводства. Наша страна была первопроходцем в создании ферм с высокой концентрацией животных, именно у нас были разработаны и реализованы технологии крупномасштабного производства продуктов животноводства. И этот бесценный опыт с успехом используется во всем мире. В США, стране классического фермерского хозяйства, на крупных специализированных фермах производится около 80 % мяса птицы, сосредоточено 65 % откорма скота и 67 % свиней. Только 8 % крупных ферм (от общего количества фермерских хозяйств) производят 73 % продукции сельского хозяйства. И процессы концентрации продолжаются как в США, так и в Западной Европе. Однако крупные животноводческие комплексы еще недостаточно безопасны для окружающей среды. В этом направлении предстоит много поработать зоотехнической и ветеринарной наукам [7].

В переходный период значительные изменения отмечены в структуре и функциях системы племенной работы. Необходимо активизировать работу по генетической оценке производителей и широкому использованию улучшателей через искусственное осеменение и биотехнологические приемы. В противном случае торможение процессов генетического улучшения популяций животных неизбежно приведет к снижению накопленного в предшествующий период ценного генетического потенциала продуктивности и будет тормозом интенсификации отрасли, а на устранение этих последствий потребуются многие годы и огромные средства [8].

Учитывая то, что генетический фонд сельскохозяйственных животных является национальным богатством страны, необходимо, используя рыночные механизмы, создать для предприятий племенного дела (особенно племзаводов) режим наибольшего благоприятствования. Таких предприятий немного, и государство могло бы это реализовать, обеспечив будущее белорусского животноводства.

В настоящее время в Республике Беларусь осуществляется ряд мер по переходу на новую систему племенной работы в свиноводстве, так как несмотря на все успехи, достигнутые в производстве свинины, и преимущества крупнотоварного свиноводства, в отрасли назрел ряд проблем, требующих немедленного эффективного решения.

В республике имеется 102 крупных промышленных комплекса по производству свинины, на которых содержится более 90 % животных, выращиваемых в сельскохозяйственных организациях республики, и производится 95 % свинины, среднесуточный прирост на выращивании и откорме – 500–550 г, затраты корма на 1 кг прироста – до 4,0–4,5 кг, выход мяса в туше – 5,8–5,9 %, что ниже среднемировых показателей на 20–25 %, в результате чего более половины производимой свинины не конкурентно на внешнем и внутреннем рынках.

Все вышеперечисленное обусловило создание новой системы селекционно-племенной работы, включающей строительство высокотехнологичных племенных ферм и репродукторов и получение на них высокопродуктивных животных, приспособленных к условиям крупнотоварного

промышленного производства. Целями создания новой системы являются повышение эффективности производства свинины на основе создания современных систем селекции, кормления и содержания животных; увеличение производства свинины в Республике Беларусь до 520–550 тыс. т и более; получение конкурентоспособного высокопродуктивного белорусского гибрида.

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи:

1. Создание системы селекционно-племенной работы в свиноводстве, направленной на получение в короткие сроки конкурентоспособных пород, типов и гибридов свиней, адаптированных к условиям промышленного производства свинины в республике и не уступающих аналогам мировой селекции;

2. Строительство высокотехнологичных племенных ферм (нуклеусов) по разведению пород как белорусской, так и мировой селекции: крупной белой, белорусской мясной (ландраса), белорусской черно-пестрой, йоркшир, ландрас, дюроч и пьетрен, с выдающимися генетически обусловленными племенными и продуктивными качествами, устойчиво передающимися потомству;

3. Формирование сети племрепродукторов по тиражированию племенного поголовья с выходом на мировые стандарты по репродуктивным, откормочным и мясным качествам;

4. Создание белорусского гибрида с продуктивностью: среднесуточный прирост от рождения до 100 кг 600 г, в том числе на откорме – 800–900 г, затраты сухого корма на 1 кг прироста – 3,0 кг, толщина шпика – 14–16 мм;

5. Организация полноценного кормления за счет ужесточения требований к качеству комбикормов и их отдельным компонентам, существенное улучшение структуры корма.

При внедрении перспективной системы племенной работы в свиноводстве предусматривается, что племзаводы первого порядка (нуклеусы) предназначаются для производства чистопородных элитных животных с целью дальнейшего их тиражирования в племрепродукторах; хозяйства-дублеры – равнозначные нуклеусам племенные заводы, работающие по селекционным программам предназначаются для получения родительских стад двухпородных свиноматок и гибридных хряков с целью поставки их на товарные комплексы и станции искусственного осеменения; станции искусственного осеменения предназначаются для поставки племенным товарным хозяйствам спермы родительских хряков.

Предлагаемые мероприятия позволят получать товарный молодняк свиней в 160–170-дневном возрасте и сократить время выращивания на 40–50 дней; существенно (на 5–6 %) повысить содержание мяса в тушах и тем самым достичь требований европейских стандартов (60–63 %).

Для производства свинины на основе предлагаемой системы необходимо повысить содержание незаменимых критических аминокислот в комбикормах для молодняка свиней на 20 %, обменной энергии – на 8 % и ввести дополнительные показатели контроля качества комбикормов и комбикормового сырья (концентрацию незаменимых критических аминокислот в белковом сырье, влажность и активность уреазы в соевом сырье, фуражное зерно для поросят только 1-го класса, кислотное число в готовых комбикормах не более 20 мг КОН) [9].

Экономическая эффективность за счет применения наукоемких инновационных технологий при сокращении удельных затрат заключается в дополнительном получении 100 тыс. т свинины.

Не менее важная задача в развитии отечественного животноводства – снижение доли зерна в рационе животных.

Следует учесть наши природно-климатические условия, в которых преобладают естественные луга и пастбища, а существенный удельный вес составляют травы в системе полевого кормопроизводства. Проблема интенсивного животноводства при экономном расходовании зерна находится в прямой зависимости от качества заготавливаемых травяных кормов, а также от структуры животноводства, от соотношения жвачных и моногастричных животных [10].

Увеличение удельного веса продуктивных лугов и пастбищ в составе сельскохозяйственных угодий является неотложной стратегической задачей кормопроизводства. До настоящего времени в нашей стране этому аспекту кормовой базы уделялось недостаточное внимание. Оно должно быть усилено потому, что прогнозируется ускоренное развитие специализированного мясного скотоводства [11].

В целом решение проблемы максимально полного использования генетического потенциала продуктивности животных потребует существенного увеличения производства кормов, повышения их качества, совершенствования структуры кормопроизводства и использование в рационах животных новых биологически активных кормовых добавок, обеспечивающих максимальную реализацию генетического потенциала высокой продуктивности сельскохозяйственных животных при сохранении хорошего здоровья и качества получаемой продукции [12].

В настоящее время мы стоим у истоков принципиально нового направления животноводства, которое наряду с производством высококачественных традиционных продуктов будет производить широкий спектр биологически активных веществ для медицины и пищевой промышленности, что повысит значение отрасли в жизни общества, усилит ее конкурентоспособность.

**Заключение.** В связи с необходимостью повышения эффективности отечественного животноводства перед зоотехнической и смежными с ней науками встают новые сложные задачи:

в области разведения сельскохозяйственных животных должны быть усилены исследования и разработки по совершенствованию систем крупномасштабной селекции с использованием математических методов моделирования и анализа информации о мировых генетических ресурсах с подключением к сети Internet;

необходимо активизировать исследования по проблемам воспроизводства животных, основанные на данных по физиологии и эндокринологии, так как низкая плодовитость наносит существенный ущерб отрасли;

особое значение следует придать развитию исследований в области биотехнологии сельскохозяйственных животных, геномной и клеточной инженерии, так как селекция сельскохозяйственных животных в XXI веке будет в большей степени основываться на результатах научных работ. Это понимает и реализует вся мировая зоотехническая наука;

получение трансгенных сельскохозяйственных животных позволяет направленно изменять параметры обмена веществ, более быстрыми темпами повышать продуктивность и улучшать качество продуктов животноводства. Методы геномной инженерии дают уникальную возможность решить актуальнейшую проблему создания животных, генетически устойчивых к ряду заболеваний;

учитывая решающую роль питания животных в получении высококачественной конкурентоспособной продукции, необходимо усилить исследования по проблемам физиологии, биохимии пищеварения и обмена веществ;

кардинальной задачей фундаментальных исследований в зоотехнологии является проблема увеличения выхода белка животного происхождения, незаменимого фактора питания человека, и снижения производства жира, прежде всего в тушах животных.

Проводимая РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по животноводству» научная и практическая работа служит повышению эффективности отрасли животноводства и конкурентоспособности производимой в республике животноводческой продукции.

### Список использованных источников

1. Шейко, И. П. Свиноводство Республики Беларусь / И. П. Шейко // Свиноводство. – 1999. – № 1. – С. 8–10.
2. Шейко, И. П. Животноводство – важная отрасль аграрного сектора Беларуси / И. П. Шейко // Научное обеспечение инновационного развития животноводства. – Жодино, 2013. – С. 3–4.
3. Шейко, И. П. Повышение конкурентоспособности белорусского животноводства / И. П. Шейко // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2013. – № 2. – С. 84–89.
4. Шейко, Иван. Концепция развития белорусского животноводства по повышению его конкурентоспособности / И. Шейко // Berkarar dowletimizin bagtyyarlyk dowrunde ylym, tehnika we innowasion tehnologiyalar = Science, technology and innovative technologies in the prosperous epoch of the powerful state = Наука, техника и инновационные технологии в эпоху могущества и счастья. – Asgabat, 2013. – С. 12–15.
5. Шейко, И. П. Селекционно-генетические аспекты повышения племенных и продуктивных качеств сельскохозяйственных животных в Беларуси / И. П. Шейко // Научные достижения Республики Беларусь. – Минск, 2017. – С. 190–193.
6. Шейко, И. П. Адаптация свиней высокоценных мясных генотипов в условиях промышленной технологии / И. П. Шейко // Белорус. сел. хоз-во. – 2009. – № 9. – С. 10–12.

7. Мысик, А. Т. Современные тенденции развития животноводства в странах мира / А. Т. Мысик // Зоотехния. – 2010. – № 1. – С. 2–8.
8. Эрнст, Л. К. Биологические проблемы животноводства в XXI веке / Л. К. Эрнст, Н. А. Зиновьева. – М., 2008. – С. 279–280.
9. Шейко, И. П. Журнал «Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук» – важнейшая веха в индустриализации животноводства Беларуси / И. П. Шейко // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2013. – № 3. – С. 5–8.
10. Прохоренко, П. Н. Современные методы генетики и селекции в животноводстве / П. Н. Прохоренко // Современные методы генетики и селекции в животноводстве. – СПб., 2007. – С. 3–5.
11. Красота, В. Ф. Разведение сельскохозяйственных животных / В. Ф. Красота, В. Л. Лобанов, Т. Г. Джапаридзе. – М., 1990. – 264 с.
12. Республиканская программа по племенному делу в животноводстве на 2007–2010 годы. – Жодино, 2008. – 475 с.

## References

1. Sheiko I. P. Pig breeding of the Republic of Belarus. *Svinovodstvo [Pig breeding]*, 1999, no. 1, pp. 8–10 (in Russian).
2. Sheiko I. P. Cattle breeding is an important branch of the agrarian sector of Belarus. *Nauchnoe obespechenie innovatsionnogo razvitiya zhivotnovodstva [Scientific support of the innovation of the cattle breeding]*. Zhodino, 2013, pp. 3–4 (in Russian).
3. Sheiko I. P. Increase of competitiveness of the belarusian animal husbandry. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2013, no. 2, pp. 84–89 (in Russian).
4. Sheiko Ivan. Concept of development of the Belarusian cattle breeding about the enhancement of its competitiveness. *Science, technology and innovative technologies in the prosperous epoch of the powerful state*. Asgabat, 2013, pp. 12–15 (in Russian).
5. Sheiko I. P. Selective-genetic aspects of enhancing breed and production qualities of farm animals in Belarus. *Nauchnye dostizheniya Respubliki Belarus' [Research Advances of the Republic of Belarus]*. Minsk, 2017, pp. 190–193 (in Russian).
6. Sheiko I. P. Adaptation of pigs of high-value meat of genotypes under the conditions of industrial technology. *Belorusskoe sel'skoe khozyaistvo [Belarusian Agriculture]*, 2009, no. 9, pp. 10–12 (in Russian).
7. Mysik A. T. Modern trends of development of cattle breeding in world countries. *Zootekhniya [Zootechny]*, 2010, no. 1, pp. 2–8 (in Russian).
8. Ernst L. K., Zinov'eva N. A. *Biological Problems of Cattle Breeding in the XXI Century*. Moscow, 2008, pp. 279–280 (in Russian).
9. Sheiko I. P. Journal “Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Series” – the most important element in the industrialization of animal husbandry of Belarus. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2013, no. 3, pp. 5–8 (in Russian).
10. Prokhorenko P. N. Modern methods of genetics and selection in cattle breeding. *Sovremennyye metody genetiki i seleksii v zhivotnovodstve [Modern methods of genetics and selection in cattle breeding]*. Saint Petersburg, 2007, pp. 3–5 (in Russian).
11. Krasota V. F., Lobanov V. L., Dzhaparidze T. G. *Breeding of Farm Animals*. Moscow, 1990. 264 p. (in Russian)
12. *Republican Program on Breeds in the Cattle Breeding for the Years 2007–2010*. Zhodino, 2008. 475 p. (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, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

*Шейко Руслан Иванович* – член-корреспондент, д-р с.-х. наук, доцент, заведующий лабораторией. НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

## Information about the authors

*Sheiko Ivan Pavlovich* – Academician, D. Sc. (Agrarian), Professor, Vice Deputy General Director. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.

*Sheiko Ruslan Ivanovich* – Corresponding Member, D. Sc. (Agrarian), Assistant Professor, Head of the Laboratory. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.