

Министерство здравоохранения Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ВОПРОСЫ ПИТАНИЯ

VOPROSY PITANIYA
(PROBLEMS OF NUTRITION)

Основан в 1932 г.

ТОМ 94

№ 6 (562), 2025

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени кандидата и доктора наук,
утвержденный Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки
и высшего образования Российской Федерации (ВАК)

Журнал представлен в следующих информационно-справочных изданиях
и библиографических базах данных: РИНЦ, eLibrary.ru, реферативный журнал ВИНТИ,
Russian Periodical Catalog, Crossref, Russian Science Citation Index (RSCI) в Web of Science (WOS),
PubMed, MEDLINE, The National Library of Medicine (NLM), Scopus, Biological Abstracts,
CAB Abstracts, The National Agricultural Library (NAL)



Тутельян Виктор Александрович, главный редактор, академик РАН, доктор медицинских наук, профессор, заведующий лабораторией энзимологии питания, научный руководитель ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (Москва, Россия)

Никитюк Дмитрий Борисович, заместитель главного редактора, академик РАН, доктор медицинских наук, профессор, заведующий лабораторией антропонириологии и спортивного питания, директор ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (Москва, Россия)

Вржесинская Оксана Александровна, ответственный секретарь редакции, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории витаминов и минеральных веществ ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (Москва, Россия)

Пузырева Галина Анатольевна, ответственный секретарь редакции, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории антропонириологии и спортивного питания ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (Москва, Россия)

Арчаков Александр Иванович (Москва, Россия)

академик РАН, доктор биологических наук, профессор, научный руководитель ФГБУ «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии им. В.Н. Ореховича»

Багиров Вугар Алиевич (Москва, Россия)

член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, профессор, директор Департамента координации деятельности организаций в сфере сельскохозяйственных наук Минобрнауки России

Батурин Александр Константинович (Москва, Россия)

доктор медицинских наук, профессор, руководитель направления «Оптимальное питание» ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»

Бойцов Сергей Анатольевич (Москва, Россия)

академик РАН, доктор медицинских наук, профессор, генеральный директор ФГБУ «НМИЦ им. ак. Е.И. Чазова» Минздрава России

Бреда Жоао (Афины, Греция)

доктор медицинских наук, руководитель офиса ВОЗ по качеству медицинской помощи и безопасности пациентов в Афинах, специальный советник регионального директора ВОЗ

Валента Рудольф (Вена, Австрия)

иностраный член РАН, профессор, руководитель Департамента иммунопатологии, кафедры патофизиологии и аллергии Медицинского университета г. Вены

Голухова Елена Зеликовна (Москва, Россия)

академик РАН, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кардиохирургическим отделением № 14 отдела неинвазивной аритмологии и хирургического лечения комбинированной патологии (ОНА) Института кардиохирургии им. В.И. Бураковского, директор ФГБУ «НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева» Минздрава России, главный внештатный специалист аритмолог Минздрава России

Зайцева Нина Владимировна (Пермь, Россия)

академик РАН, доктор медицинских наук, профессор, научный руководитель ФБУН «ФНЦ медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения»

Исаков Василий Андреевич (Москва, Россия)

доктор медицинских наук, профессор, заведующий отделением гастроэнтерологии, гепатологии и диетотерапии ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»

Кочеткова Алла Алексеевна (Москва, Россия)

академик РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией пищевых биотехнологий и специализированных продуктов ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»

Онищенко Геннадий Григорьевич (Москва, Россия)

академик РАН, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой экологии человека и гигиены окружающей среды Института общественного здоровья им. Ф.Ф. Эрисмана ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), заместитель президента ФГБУ «Российская академия образования»

Пилат Татьяна Львовна (Москва, Россия)

доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник клинического отдела профессиональных и производственно обусловленных заболеваний ФГБУ «НИИ МТ»

Попова Анна Юрьевна (Москва, Россия)

доктор медицинских наук, профессор, руководитель Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главный государственный санитарный врач РФ

Савенкова Татьяна Валентиновна (Москва, Россия)

доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института качества, безопасности и технологий специализированных пищевых продуктов ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова»

Салагай Олег Олегович (Москва, Россия)

кандидат медицинских наук, статс-секретарь – заместитель министра здравоохранения РФ

Стародубова Антонина Владимировна (Москва, Россия)

доктор медицинских наук, заведующий отделением сердечно-сосудистой патологии и диетотерапии, заместитель директора по научной и лечебной работе ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», заведующий кафедрой факультетской терапии Института клинической медицины ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России (Пироговский Университет)

Хотимченко Сергей Анатольевич (Москва, Россия)

член-корреспондент РАН, доктор медицинских наук, профессор, заведующий лабораторией пищевой токсикологии и оценки безопасности нанотехнологий ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»

Цацакис Аристидис Михаил (Крит, Греция)

иностраный член РАН, профессор, руководитель Департамента токсикологии и судебной медицины при Университете Крита, председатель отдела морфологии Медицинской школы Университета Крита

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Акимов М.Ю. (Ичмулинск, Россия)

Бакиров А.Б. (Уфа, Россия)

Бессонов В.В. (Москва, Россия)

Боровик Т.Э. (Москва, Россия)

Гильмиярова Ф.Н. (Самара, Россия)

Глухов А.И. (Москва, Россия)

Камбаров А.О. (Москва, Россия)

Коденцова В.М. (Москва, Россия)

Кузьмин С.В. (Москва, Россия)

Мазо В.К. (Москва, Россия)

Погожева А.В. (Москва, Россия)

Полунин В.С. (Москва, Россия)

Римарева Л.В. (Москва, Россия)

Сазонова О.В. (Самара, Россия)

Симоненко С.В. (Москва, Россия)

Сон И.М. (Москва, Россия)

Сорвачева Т.Н. (Москва, Россия)

Сычик С.И. (Минск, Беларусь)

Турчанинов Д.В. (Омск, Россия)

Хенсел А. (Берлин, Германия)

Шабров А.В. (Санкт-Петербург, Россия)

Шарафетдинов Х.Х. (Москва, Россия)

Шевелева С.А. (Москва, Россия)

Научно-практический журнал «Вопросы питания» № 6 (562), 2025

Выходит 6 раз в год.

Основан в 1932 г.

Свидетельство о регистрации
средства массовой информации
ПИ № ФС77-79884 от 25.12.2020.

ISSN 0042-8833 (print)
ISSN 2658-7440 (online)

Все права защищены.

Никакая часть издания
не может быть воспроизведена
без согласия редакции.

При перепечатке публикаций
с согласия редакции ссылка
на журнал «Вопросы питания»
обязательна.

Ответственность за содержание
рекламных материалов
несут рекламодатели.

Адрес редакции

109240, г. Москва,
Устьинский проезд, д. 2/14,
ФГБУН «ФИЦ питания
и биотехнологии», редакция
журнала «Вопросы питания»

Научный редактор

Вржесинская Оксана Александровна
(495) 698-53-60, red@ion.ru

Подписной индекс

каталог «Пресса России»: 88007

Сайт журнала:

<http://www.voprosy-pitaniya.ru>

Издатель

ООО Издательская группа
«ГЭОТАР-Медиа»
115035, г. Москва, ул. Садовническая,
д. 11, стр. 12
Телефон: (495) 921-39-07
www.geotar.ru

Выпускающий редактор:

Красникова Ольга, krasnikova@geotar.ru

Корректор: Макеева Елена

Верстка: Килимник Арина

Подписано в печать: 19.12.2025

Дата выхода в свет: 29.12.2025

Тираж 3000 экземпляров.
Формат 60×90 1/8.
Печать офсетная. Печ. л. 19,5.
Отпечатано в ООО «Фотоэксперт»
109316, г. Москва,
Волгоградский проспект, д. 42.
Заказ №

Цена свободная.

© ООО Издательская группа
«ГЭОТАР-Медиа», 2025

Victor A. Tutelyan, Editor-in-Chief, Full Member of Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Nutrition Enzymology, Scientific supervisor of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety (Moscow, Russia)

Dmitriy B. Nikityuk, Full Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Anthroponutrition and Sport Nutrition, Director of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety (Moscow, Russia)

Oksana A. Vrzhesinskaya, Executive Secretary of the Editorial Office, PhD, Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Vitamins and Minerals of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety (Moscow, Russia)

Galina A. Puzyreva, Executive Secretary of the Editorial Office, PhD, Candidate of Biological Sciences, Researcher of the Laboratory of Anthroponutrition and Sport Nutrition of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety (Moscow, Russia)

Scientific and practical journal «Problems of Nutrition» N 6 (562), 2025

6 times a year.
Founded in 1932.

The mass media
registration certificate
PI No. FS77-79884 from 25.12.2020.

ISSN 0042-8833 (print)
ISSN 2658-7440 (online)

All rights reserved.

No part of the publication
can be reproduced without
the written consent of editorial office.

Any reprint of publications with consent
of editorial office should obligatory
contain the reference to the «Problems
of Nutrition» provided the work is
properly cited.

The content
of the advertisements is the
advertiser's responsibility.

Address of the editorial office

109240, Moscow,
Ust'inskiy driveway, 2/14,
Federal Research Centre of Nutrition,
Biotechnology and Food Safety, editorial
office of the «Problems of Nutrition»

Science editor

Oksana A. Vrzhesinskaya
(495) 698-53-60, red@ion.ru

Subscription index

in catalogue of «Press of Russia»: **88007**

The journal's website:

<http://www.voprosy-pitaniya.ru>

Publisher

GEOTAR-Media Publishing Group
Sadovnicheskaya st.,
11/12, Moscow,
115035, Russia
Phone: (495) 921-39-07
www.geotar.ru

Desk editor:

Krasnikova Olga, krasnikova@geotar.ru

Proofreader: Makeeva E.I.

Layout: Kilimnik A.I.

Signet in print: 19.12.2025
Publication date: 29.12.2025

Circulation of 3000 copies.
Format 60×90 1/8.
Offset printing. 19.5 sh.
LLC «Photoexpert»
109316, Moscow,
Volgogradsky Prospect, 42.
Order N

Uncontrolled price.

© GEOTAR-Media Publishing Group,
2025

Aleksander I. Archakov (Moscow, Russia)

Full Member of Russian Academy of Sciences, Doctor of Biological Sciences, Professor, Scientific Director of Institute of Biomedical Chemistry named after V.N. Orekhovich

Vugar A. Bagirov (Moscow, Russia)

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Biological Sciences, Professor, Director of the Department for Coordination and Support of Organizations in the Field of Agricultural Sciences the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Aleksander K. Baturin (Moscow, Russia)

Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department «Optimal Nutrition» of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety

Sergey A. Boytsov (Moscow, Russia)

Full Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, General Director of National Medical Research Centre of Cardiology named after Academician E.I. Chazov of the Ministry of Health of the Russian Federation

Joao Breda (Athens, Greece)

PhD MPH MBA, Head of the WHO Athens Office for Quality of Care and Patient Safety and Special Adviser of the WHO Regional Director

Rudolf Valenta (Vienna, Austria)

Foreign Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Head of the Laboratory for Allergy Research of Division of Immunopathology at the Department of Pathophysiology and Allergy Research at the Center for Pathophysiology, Infectology and Immunology of Medical University of Vienna

Elena Z. Golukhova (Moscow, Russia)

Full Member of Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Cardiac Surgery Department No. 14 of the Department of Non-Invasive Arrhythmology and Surgical Treatment of Combined Pathology of the V.I. Bourakovskiy Institute for Cardiac Surgery, Director of A.N. Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery

Nina V. Zaitseva (Perm', Russia)

Full Member of Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Scientific Supervisor of the Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies

Vasily I. Isakov (Moscow, Russia)

Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Gastroenterology, Hepatology and Diet Therapy of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety

Alla A. Kochetkova (Moscow, Russia)

Full Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Food Biotechnology and Specialized Preventive Products of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety

Gennady G. Onishchenko (Moscow, Russia)

Full Member of Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, head of the Department of Human Ecology and Environmental Hygiene of I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Deputy President of the Russian Academy of Education

Tatiana L. Pilat (Moscow, Russia)

Doctor of Medical Sciences, Leading Researcher, Clinical Department of Occupational and Work-Related Diseases of Izmerov Research Institute of Occupational Health

Anna Yu. Popova (Moscow, Russia)

Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing

Tatiana V. Savenkova (Moscow, Russia)

Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Scientific Research Institute for the Quality, Safety and Technologies of Specialized Products of the Plekhanov Russian University of Economics

Oleg O. Salagay (Moscow, Russia)

PhD, Candidate of Medical Sciences, State Secretary – Deputy Minister of Health Care of the Russian Federation

Antonina V. Starodubova (Moscow, Russia)

Doctor of Medical Sciences, Head of the Department of Cardiovascular Pathology and Diet Therapy, Deputy Director for Scientific and Medical Work of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Head of the Department of Faculty Therapy at the Institute of Clinical Medicine at the N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation (Pirogov University)

Sergey A. Khotimchenko (Moscow, Russia)

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Food Toxicology and Safety Assessments of Nanotechnology Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety

Aristides M. Tsatsakis (Crete, Greece)

Foreign Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, the Director of the Department of Toxicology and Forensic Sciences of the Medical School at the University of Crete and the University Hospital of Heraklion, the Chairman of the Division of Morphology of the Medical School of the University of Crete in Greece

EDITORIAL COUNCIL

Akimov M.Yu. (Michurinsk, Russia)

Bakirov A.B. (Ufa, Russia)

Bessonov V.V. (Moscow, Russia)

Borovik T.E. (Moscow, Russia)

Gilmiyarova F.N. (Samara, Russia)

Glukhov A.I. (Moscow, Russia)

Hensel A. (Berlin, Germany)

Kambarov A.O. (Moscow, Russia)

Kodentsova V.M. (Moscow, Russia)

Kuzmin S.V. (Moscow, Russia)

Mazo V.K. (Moscow, Russia)

Pogozheva A.V. (Moscow, Russia)

Polunin V.S. (Moscow, Russia)

Rimareva L.V. (Moscow, Russia)

Sazonova Olga V. (Samara, Russia)

Simonenko S.V. (Moscow, Russia)

Son I.M. (Moscow, Russia)

Sorvacheva T.N. (Moscow, Russia)

Sychik S.I. (Minsk, Belarus')

Turchaninov D.V. (Omsk, Russia)

Shabrov A.V. (St. Petersburg, Russia)

Sharafetdinov Kh.Kh. (Moscow, Russia)

Sheveleva S.A. (Moscow, Russia)

ОБЗОРЫ

**Есипов А.В., Гуляев Н.И., Петко А.П.,
Прохорчик А.А., Погожева А.В.**

Значение хронопитания для метаболического здоровья человека

ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ ПИТАНИЯ

**Козин С.В., Сигарева А.С., Моисеев А.В.,
Козлова Е.А., Рубайло А.Д., Кравцов А.А.**

Влияние питьевого рациона с повышенным содержанием дейтерия на микробиом кишечника и антиоксидантный статус организма крыс

Иванова Г.Т.

Влияние полифенолов на дилатацию сосудов крыс, получающих высокожировую рацион

**Кузнецова О.Ю., Горбачева И.В.,
Гильмиярова Ф.Н.**

Белково-энергетическая недостаточность у детей первого года жизни как фактор риска дислипотеинемии

ГИГИЕНА ПИТАНИЯ

Конев А.Д., Седова И.Б., Тутельян В.А.

Альтернативные токсины как угроза здоровью: цитотоксические эффекты

Титова Д.И., Меджидов И.М., Харламов В.А.

Идентификация факта радиационной деконтаминации специй, реализуемых на российском рынке: результаты исследований с использованием электронного парамагнитного резонанса

ЛЕЧЕБНОЕ И ПРОФИЛАКТИЧЕСКОЕ ПИТАНИЕ

**Смирнова Е.А., Бессонов В.В.,
Шахвалиева Э.С.-А., Щербakov Г.Д.,
Кешабынц Э.Э., Андрoнова М.С., Тутельян В.А.**

К вопросу о цифровизации химического состава пищевой продукции

Трушина Э.Н., Ригер Н.А., Никитюк Д.Б.

Эффективность применения спирулины (*Arthrospira platensis*) в клинике и эксперименте: механизмы действия и перспективы использования в качестве функционального пищевого ингредиента

Барило А.А., Смирнова С.В.

Клинический случай ассоциации пищевой и пыльцевой аллергии с акне

**Симоненко Е.С., Симоненко С.В., Зорин С.Н.,
Короткова Т.Н., Тармаева И.Ю.**

Комплексное исследование белков кобыльего и коровьего молока и их гидролизатов у детей с аллергией к белкам коровьего молока

REVIEW

6 **Esipov A.V., Gulyaev N.I., Petko A.P.,
Prokhorchik A.A., Pogozeva A.V.**

The importance of chrononutrition for human metabolic health

PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY OF NUTRITION

15 **Kozin S.V., Sigareva A.S., Moiseev A.V.,
Kozlova E.A., Rubailo A.D., Kravtsov A.A.**

Drinking with increased deuterium content affects the gut microbiome and the antioxidant status of the organism

28 **Ivanova G.T.**

Effect of polyphenols on vascular dilation in rats receiving a high-fat diet

37 **Kuznetsova O.Yu., Gorbacheva I.V.,
Gilmiyarova F.N.**

Protein-energy deficiency in children of the first year of life as a risk factor for dislipoproteinemia

HYGIENE OF NUTRITION

47 **Konev A.D., Sedova I.B., Tutelyan V.A.**

Alternia toxins as a health threat: cytotoxic effects

58 **Titova D.I., Medzhidov I.M., Kharlamov V.A.**

The radiation decontamination detecting in commercial spices marketed in Russia: interpreting the spectra of electron paramagnetic resonance

THERAPEUTIC AND PREVENTIVE NUTRITION

69 **Smirnova E.A., Bessonov V.V.,
Shakhvalieva E.S.-A., Shcherbakov G.D.,
Keshabyants E.E., Andronova M.S., Tutelyan V.A.**

On digitalizing the analysis of food chemistry composition data

80 **Trushina E.N., Rieger N.A., Nikityuk D.B.**

Clinical and experimental efficacy of spirulina (*Arthrospira platensis*): mechanisms of action and prospects for use as a functional food ingredient

90 **Barilo A.A., Smirnova S.V.**

Clinical case of association of food and pollen allergy with acne

97 **Simonenko E.S., Simonenko S.V., Zorin S.N.,
Korotkova T.N., Tarmaeva I.Yu.**

Comprehensive study of mare's and cow's milk proteins and their hydrolysates in children with allergy to cow's milk proteins

МИКРОНУТРИЕНТЫ В ПИТАНИИ**Мартинчик Э.А., Вржесинская О.А.,
Жилинская Н.В.**Актуальные подходы к обоснованию
допустимых уровней потребления витаминов
и минеральных веществ**СПОРТИВНОЕ ПИТАНИЕ****Людина А.Ю., Бушманова Е.А.,
Логинова Т.П., Гарнов И.О., Бойко Е.Р.**Влияние различных соотношений жиров
и углеводов в рационе лыжников-гонщиков
на время выполнения теста «до отказа»
и соревновательную результативность**Кобелькова И.В., Вржесинская О.А.,
Тармаева И.Ю.**Анализ рынка специализированных продуктов
для питания спортсменов детско-юношеского
возраста**ИНФОРМАЦИЯ**Резолюция XIX Международного конгресса
диетологов и нутрициологов
«Оптимальное питание – основа продолжительной
и активной жизни», посвященного 95-летию ФГБУН
«ФИЦ питания и биотехнологии»**ЮБИЛЕИ****Анна Юрьевна Попова****Вероника Игоревна Скворцова****Геннадий Григорьевич Онищенко****MICRONUTRIENTS IN NUTRITION**106 **Martinchik E.A., Vrzhesinskaya O.A.,
Zhilinskaya N.V.**Current approaches for vitamins and minerals tolerable
intake levels substantiation**NUTRITION OF SPORTSMEN**118 **Lyudinina A.Yu., Bushmanova E.A.,
Loginova T.P., Garnov I.O., Bojko E.R.**Effects of different fat-to-carbohydrate ratio in
cross-country skiers on time "until exhaustion" and
competitive performance129 **Kobelkova I.V., Vrzhesinskaya O.A.,
Tarmayeva I.Yu.**Analysis of the market of specialized foodstuffs
for nutrition of athletes of child and youth age**INFORMATION**Resolution of the 19th International Congress
of Dietitians and Nutritionists
“Optimal Nutrition as the Foundation of a Long
and Active Life”, Dedicated to the 95th Anniversary
of the Federal Research Centre of Nutrition,
Biotechnology and Food Safety**ANNIVERSARIES**154 **Anna Yu. Popova**155 **Veronika I. Skvortsova**156 **Gennady G. Onishchenko**

Для корреспонденции

Гуляев Николай Иванович – доктор медицинских наук, доцент, начальник кардиологического центра – главный кардиолог ФГБУ «НМИЦ ВМТ им. А.А. Вишневого» Минобороны России, профессор кафедры терапии неотложных состояний филиала ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова» Минобороны России в г. Москве, профессор кафедры госпитальной терапии с курсами эндокринологии, гематологии и клинической лабораторной диагностики ФГАОУ ВО РУДН им. Патриса Лумумбы
Адрес: 143420, Российская Федерация, Московская область, Красногорский район, п/о Архангельское, пос. Новый
Телефон: (495) 562-12-74
E-mail: nig27@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7578-8715>

Есипов А.В.¹, Гуляев Н.И.¹⁻³, Петько А.П.¹, Прохорчик А.А.^{1, 2}, Погожева А.В.⁴

Значение хронопитания для метаболического здоровья человека

The importance of chrononutrition for human metabolic health

Esipov A.V.¹, Gulyaev N.I.¹⁻³, Petko A.P.¹, Prokhorchik A.A.^{1, 2}, Pogozheva A.V.⁴

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр высоких медицинских технологий – Центральный военный клинический госпиталь имени А.А. Вишневого» Министерства обороны Российской Федерации, 143420, г. Красногорск, Московская область, Российская Федерация

² Филиал Федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации в г. Москве, 107392, г. Москва, Российская Федерация

³ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», 117198, г. Москва, Российская Федерация

⁴ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, 109240, г. Москва, Российская Федерация

¹ National Medical Research Center for High Medical Technologies named after A.A. Vishnevsky, Ministry of Defense of Russian Federation, 143420, Krasnogorsk, Moscow Region, Russian Federation

² Branch of the Military Medical Academy named after S.M. Kirov, Ministry of Defense of Russian Federation, 107392, Moscow, Russian Federation

³ Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, 117198, Moscow, Russian Federation

⁴ Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, 109240, Moscow, Russian Federation

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Вклад авторов. Концепция и дизайн исследования – Есипов А.В.; сбор и обработка данных, написание статьи – Гуляев Н.И., Погожева А.В.; редактирование, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи – все авторы.

Для цитирования: Есипов А.В., Гуляев Н.И., Петько А.П., Прохорчик А.А., Погожева А.В. Значение хронопитания для метаболического здоровья человека // Вопросы питания. 2025. Т. 94, № 6. С. 6–14. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-6-14>

Статья поступила в редакцию 23.09.2025. Принята в печать 25.11.2025.

Биоритмы играют огромную роль в саморегуляции живых систем и регуляции их взаимодействия с окружающей средой. Циркадные ритмы представляют собой периодичность внутренних биологических механизмов, которые определяют состояние обменных процессов, в том числе таких, как потребление пищевых веществ и энергии (хронопитание). Хронопитание – это питание, которое осуществляется в соответствии с хронотипом: утренний, промежуточный или вечерний тип.

Цель исследования – анализ и обобщение данных, характеризующих эффективность хронопитания при различных диетических режимах.

Материал и методы. Для основного поиска источников за последние 5 лет использовали библиографические базы РИНЦ, PubMed и поисковую систему Google Scholar.

Результаты. В обзоре представлены материалы исследований, посвященных изучению эффективности хронопитания при различных диетических режимах, направленных на коррекцию избыточной массы тела. Проведена сравнительная оценка влияния низкокалорийных диет и периодического голодания на антропометрические параметры и кардиометаболические риски лиц с избыточной массой тела и ожирением. Не выявлено преимуществ периодического голодания перед применением низкокалорийных диет. Анализ данных многих исследований продемонстрировал важную роль режима питания, согласованного с циркадными ритмами, в улучшении метаболического здоровья.

Заключение. Особенности хронопитания должны обязательно приниматься во внимание при назначении любых диетических вмешательств, в том числе при использовании низкокалорийных диет и стратегии питания, ограниченного по времени.

Ключевые слова: циркадный ритм; хронопитание; метаболическое здоровье; питание, ограниченное по времени; периодическое голодание; низкокалорийная диета

Biorhythms play a huge role in the self-regulation of living systems and in the regulation of their interaction with the environment. Circadian rhythms are the periodicity of internal biological mechanisms that determine the state of metabolic processes, including those related to nutrient and energy consumption (chrononutrition). Chrononutrition is a type of food intake that is based on the chronotype: morning, intermediate, or evening type.

The purpose of the study was to analyze and summarize data that characterize the effectiveness of chrononutrition under different dietary regimes.

Material and methods. For the main search of sources over the past 5 years, we used the bibliographic databases of the Russian Science Citation Index, PubMed, as well as the non-commercial search engine Google Scholar.

Results. The review presents the results of studies on the chrononutrition effectiveness under various dietary regimes aimed at correcting excess body weight. A comparative assessment of the effect of low-calorie diets and intermittent fasting on anthropometric parameters and cardiometabolic risks in individuals with overweight and obesity has been conducted. No advantages of intermittent fasting over low-calorie diets have been found. The analysis of the data demonstrated the important role of a dietary pattern that is consistent with circadian rhythms in improving metabolic health.

Conclusion. The features of chrononutrition must be taken into account when prescribing any dietary interventions, including low-calorie diets and time-limited eating strategies.

Keywords: circadian rhythm; chrononutrition; metabolic health; time-restricted eating; intermittent fasting; low-calorie diet

В организме человека все физиологические процессы подвержены циклическим колебаниям (биоритмам), которые являются генетически запрограммированными, автономными и формируются при взаимодействии организма со средой [1–3]. Биоритмы играют огромную роль в саморегуляции живых систем.

Циркадные ритмы – это периодические колебания во внутренних биологических механизмах, которые определяют поведение и обменные процессы, такие как сон и бодрствование, работоспособность, гормональные сигналы, температура тела, потребление и усвоение пищевых веществ (хронопитание) [1, 2].

Funding. The study has no sponsorship.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Contribution. Study concept and design – Esipov A.V.; data collection and processing, article writing – Gulyaev N.I., Pogozheva A.V.; editing, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article – all authors.

For citation: Esipov A.V., Gulyaev N.I., Petko A.P., Prokhorchik A.A., Pogozheva A.V. The importance of chrononutrition for human metabolic health. *Voprosy pitaniia* [Problems of Nutrition]. 2025; 94 (6): 6–14 DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-6-14> (in Russian)

Received 23.09.2025. **Accepted** 25.11.2025

Физиологические различия утреннего и вечернего хронотипов [3]

Physiological differences between morning and evening chronotypes [3]

Показатель / Indicator	Утренний хронотип <i>Morning chronotype</i>	Вечерний хронотип <i>Evening chronotype</i>
Сдвиг внутренних биологических часов, ч	-2–3	+2–3
Время пробуждения	4:00–6:00	8:00–10:00
Время засыпания	20:00–22:00	24:00–2:00
Пик активности	8:00–10:00	После 16:00
Продолжительность сна	Нет достоверных отличий	
Процент долго- и короткоспящих	Нет достоверных отличий	
Минимальная температура тела (время)	4:00	6:00
Способность адаптироваться к работе в ночную смену	Плохая	Хорошая
Ген <i>hPer1</i> (<i>human period gene 1</i>)	Нет достоверных отличий	
Синдром смещения фазы сна (мутация гена <i>hPer2</i>)	Встречается	Не встречается
Ген <i>hPer3</i>	Длинная копия	Короткая копия
Ключевые гены биологических часов («Clock» гены): <i>Arntl</i> (<i>Bmal1</i> или <i>Mop3</i>), <i>Arntl2</i> , <i>Cry1</i> , <i>Cry2</i> , <i>Ckl1</i> и др.	Различия изучены недостаточно	
Частота сезонной депрессии	Низкая	Высокая
Типичные заболевания	Атеросклероз, ишемическая болезнь сердца, артериальная гипертензия, ожирение	Неврозы, астенические и депрессивные состояния, бессонница
Доминирующее полушарие головного мозга	Левое	Правое
Творческая активность, воображение	Меньше	Больше
Характер мышления	Абстрактно-логическое, аналитическое	Конкретно-предметное, холистическое
Частота употребления алкоголя, кофе и курение	Меньше	Больше

Хронопитание – питание в соответствии с хронотипом, т.е. индивидуальными, эволюционно выработанными и генетически predetermined особенностями суточных ритмов организма человека. В 1970 г. шведский психолог О. Оквист предложил 3 основных хронотипа человека: утренний (ранний, «жаворонки»), промежуточный (индифферентный, аритмичный, «голуби»), вечерний (поздний, «совы») тип. Ориентировочно частота распределения хронотипов составляет: утренний тип (УТ) – 15%, промежуточный – 65% и вечерний тип (ВТ) – 20% (см. таблицу) [3].

Рассогласование ритмов негативно влияет на многие жизненные функции, характер эмоционального реагирования, особенности сложившегося жизненного стереотипа, а при снижении порога психологической резистентности может приводить к развитию различных патологических состояний [3]. Хроническое несоответствие циркадных ритмов связано с повышенным риском различных метаболических нарушений.

Циркадные ритмы регулируются и синхронизируются с естественным циклом свет/темнота главными часами в супрахиазматических ядрах гипоталамуса. Супрахиазматические ядра являются основными стимуляторами периферических часов, присутствующих в различных метаболических тканях, включая жировую ткань, печень и кишечник, оказывая свое влияние через нейрогормональные факторы. Другие внешние сигналы, такие как время и состав потребляемой пищи, способны устанавливать ритмы в периферических часах, а также в генах, контролируемых часами, в тканях и органах тела. В свою очередь, гены часов и их связь с метаболическими генами могут использо-

ваться в качестве терапевтических мишеней для лечения метаболических расстройств, ожирения, сахарного диабета [3, 4].

Время потребления калорий в течение циркадного вечера и/или ночи относительно начала секреции мелатонина (маркер циркадной фазы, который обычно появляется за 2–4 ч до начала сна) связано с повышенным содержанием жировой ткани в организме в большей степени, чем с содержанием макронутриентов в потребляемых калориях и продолжительностью сна. Это объясняется в том числе снижением термического эффекта пищи, который представляет собой энергию, затрачиваемую в ответ на ее прием. Последствием приема пищи ближе к началу выработки мелатонина (за 4 ч до сна) или после него может быть более низкая реакция термического эффекта пищи, что будет способствовать положительному энергетическому балансу и увеличению массы тела с течением времени. Кроме того, в результате регуляции циркадных часов секреция и реакция β-клеток, чувствительность к инсулину и поглощение мышечной глюкозы усиливаются в утренние часы по сравнению с дневными и ночными [5].

В связи с этим считают, что метаболизм оптимален для приема пищи утром (т.е. завтрака). Напротив, прием пищи в неподходящее время может иметь десинхронизирующий эффект на биологические циркадные часы, что приводит к неблагоприятным последствиям для здоровья, включая увеличение массы тела, ожирение и плохие метаболические показатели, поэтому вечернее и ночное время оптимальны для голодания и сна [5, 6].

Существуют убедительные доказательства того, что нарушение метаболического здоровья тесно связано

с различными пищевыми привычками, такими как отказ от завтрака, потребление калорийной пищи в ночное время, а также с временными интервалами приема пищи (например, с количеством приемов пищи и продолжительностью окна для приема пищи) [1, 7, 8]. Помимо этого, как свидетельствуют результаты некоторых исследований, поздний ужин ухудшает постпрандиальный уровень глюкозы и инсулина по сравнению с этими показателями у людей с более ранним приемом пищи [1, 9].

Циркадные ритмы, или биологические часы, механически управляют физиологическими процессами, такими как усвоение пищи и метаболизм пищевых веществ, а в течение дня суточный ритм гомеостаза глюкозы снижает секрецию и чувствительность к инсулину, что, в свою очередь, снижает толерантность к глюкозе вечером [9]. Следовательно, несоответствие между приемом пищи и циркадной системой организма может негативно сказаться на метаболическом здоровье.

Растущая во всем мире тенденция к более позднему приему пищи представляет собой не только проблему для общественного здравоохранения, но и потенциальную причину роста распространенности метаболических нарушений [10]. В исследованиях других авторов было также обнаружено, что время приема пищи и компоненты хронопитания существенно ассоциированы с качеством рациона [11–13].

Хронотип влияет на пищевые привычки человека и фактически определяет его врожденную склонность быть наиболее внимательным и продуктивным в определенное время суток, например утром или вечером. Кроме того, люди, которые обычно принимают основную пищу вечером, называемые людьми с ВТ или поздним циркадным фенотипом, могут быть дополнительно подвержены ожирению и нарушениям обмена веществ [10]. Согласно недавно проведенному метаанализу, люди с ВТ имели худшие профили кардиометаболического риска и были более склонны к развитию сахарного диабета, чем люди с УТ [14].

Кроме того, люди с хронотипом ВТ имеют серьезные нарушения в своих циркадных ритмах из-за социально навязанных графиков, таких как раннее начало работы или учебы. В результате ранний завтрак из-за социальных обязательств может усугубить это циркадное смещение. Напротив, поздний ужин может негативно сказаться на метаболизме людей с УТ, например повысить риск ожирения. Это связано с тем, что в течение дня их естественная метаболическая эффективность снижается, что делает поздний прием пищи еще более вредным. Помимо этого, употребление пищи после наступления темноты, когда уровень мелатонина повышен, связано с ухудшением толерантности к глюкозе и нарушениями обмена веществ. Более того, у вечерних хронотипов, как правило, наблюдается задержка сна, что может еще больше влиять на регуляцию обмена веществ [15].

В систематическом обзоре 24 исследований с участием от 44 до 3304 здоровых взрослых старше 18 лет (мужчин и/или женщин) обследованные были классифицированы в соответствии с хронотипом (УТ, промежуточ-

ный тип, ВТ) и составом тела на основании результатов оценки питания, пищевого поведения и/или биомаркеров. Для систематизации хронотипов использовали тест на хронотип Хорна–Остберга (MEQ) и Мюнхенский опросник хронотипа (MCTQ) [16]. Как УТ, так и ВТ в целом имели схожее потребление энергии и макронутриентов, однако была значительная линейная связь между распределением энергии и принадлежностью к ВТ и вероятностью избыточной массы тела или ожирения [6].

Обследованные с ранним приемом пищи (УТ) потребляли больше энергии утром (а именно в течение 2 ч после пробуждения) и имели меньший риск развития избыточной массы тела или ожирения. В то же время люди с ВТ потребляли больше энергии вечером (в течение 2 ч перед сном) и были в 4,94 раза более склонны к набору массы тела или ожирению, чем с УТ. Вместе с этим УТ продемонстрировал больший контроль над своим пищевым поведением. Участники с УТ имели более высокие баллы сдержанности в еде, которые были связаны с большим потреблением «здоровой пищи», такой как зеленые овощи, и меньшим – высококалорийных продуктов с высоким содержанием жиров.

При сравнении УТ было отмечено, что участники с ВТ подвергаются более высокому риску неблагоприятного метаболического здоровья, о чем свидетельствуют их более низкий уровень холестерина липопротеинов высокой плотности и более высокие концентрации триглицеридов в сыворотке крови, более высокие показатели метаболического синдрома, концентрации инсулина и HOMA-IR. Обзор также показал, что недостаточный сон (его более короткая продолжительность) и принадлежность к ВТ связаны с нарушением активности гормона регуляции аппетита – лептина, а также с повышением концентрации в сыворотке крови инсулина, что может привести к инсулинорезистентности. Хроническое смещение циркадных часов приводит к повышению концентрации лептина в течение дня и ночи, возможно, из-за избыточной секреции и резистентности к нему, что является порочным кругом, поскольку, в свою очередь, может способствовать перееданию [6].

В другом исследовании изучали связь распределения приемов пищи при различных хронотипах (УТ и ВТ) с кардиометаболическим здоровьем. Перекрестное исследование было проведено среди 574 женщин в Тегеране (Иран). Потребление пищи оценивали с помощью 3 опросов 24-часового воспроизведения питания. Участники сообщали о следующих приемах пищи: завтрак, обед, ужин или перекусы. Основными приемами пищи считались: завтрак, который употребляли с 5:00 до 11:00; обед – с 11:00 до 16:00; полдник – с 16:00 до 18:00; ужин – после 18:00 и до раннего утра [17]. Хронотип определяли с помощью вопросника MEQ «Утро–вечер» [16]. Были измерены кардиометаболические маркеры, включая уровень артериального давления (АД), концентрации глюкозы, липидов, инсулина и высокочувствительного С-реактивного белка.

Умеренное потребление энергии (около 23% от общей калорийности рациона) во время завтрака было связано

с благоприятными показателями АД, в то время как более низкое, так и более высокое потребление – с неблагоприятными последствиями, особенно у людей с ВТ. У лиц с ВТ по сравнению с УТ более высокая калорийность завтрака была линейно связана с более низким уровнем систолического и диастолического АД, а потребление энергии во время обеда – с более низким индексом массы тела (ИМТ) и уровнем С-реактивного белка. Напротив, более высокое потребление женщинами с ВТ калорий за ужином линейно коррелировало с более высоким ИМТ. Время приема пищи было связано с более высоким уровнем глюкозы в крови натощак у лиц с ВТ по сравнению с УТ. Был сделан вывод: если синхронизировать потребление энергии со временем пробуждения, а не откладывать прием пищи на позднее время, то это может быть полезно для ВТ, склонных к нарушению циркадных ритмов. Умеренное потребление пищи на завтрак и в обед при меньшем количестве пищи на ужин положительно сказывается на кардиометаболическом здоровье [17].

В связи с этим очевидно, что нарушение циркадных ритмов, обусловленное изменениями режима питания, оказывает значительное влияние на метаболическое здоровье. Важным фактором, направленным на поддержание метаболического здоровья, является контроль массы тела для энергетического баланса. Ожирение способствует хроническому провоспалительному состоянию, которое связано с развитием резистентности к инсулину – первичной стадией метаболических нарушений, которые, в свою очередь, являются патофизиологической основой развития сердечно-сосудистых заболеваний и ускоренного старения. Профилактические и терапевтические вмешательства, направленные на борьбу с системным воспалением и резистентностью к инсулину, могут замедлить темп прогрессирования заболеваний и улучшить качество жизни [18–20].

В последнее время одним из возможных методов лечения ожирения и снижения риска развития ассоциированных с ним метаболических заболеваний некоторые исследователи считают стратегию питания, ограниченного по времени (ПОВ), в том числе имея в виду коррекцию образа жизни, циркадными в соответствии с биологическими циркадными ритмами. Стратегия ПОВ привлекает все большее внимание как населения в целом, так и мирового научного сообщества. Подобные тенденции служат основой для изучения эффективности ПОВ с целью снижения избыточной массы тела и коррекции кардиометаболических нарушений у таких пациентов [1, 20].

Отсутствие общепринятой терминологии для описания различных режимов прерывистого ограничения энергоресурсов создает немалые трудности для их стандартизации и классификации. В литературе встречаются термины, характеризующие различные режимы периодического голодания (ПГ), не имеющие четко очерченных критериев, что приводит к их двоякому толкованию. Так, понятие «интервальное голодание» нередко используется для обобщения режимов «питания с ограничением по времени» (ПОВ), при которых не предпола-

гается ограничений ежедневного потребления калорий, но ограничивается окно приема пищи 4–10 ч в день [20]. В течение этого обозначенного времени участникам разрешается потреблять пищу по желанию. За пределами этих часов потребление калорий строго ограничивается водой или напитками с нулевой калорийностью.

Для обобщения пищевых режимов с регулярными, но достаточно длительными периодами голодания довольно часто встречается термин «периодическое голодание», как правило, подразумевающее режимы питания с периодами голодания продолжительностью от 2 и более последовательных или непоследовательных дней в неделю. В свою очередь, понятия «интервальное голодание» и «периодическое голодание» зачастую подменяют друг друга [1, 20]. Кроме того, в клинической практике некоторые диетические подходы обобщены термином «диета, имитирующая голодание» – режим питания с низким или очень низким содержанием калорий (от 300 до 1200 ккал в день), с продолжительностью обычно 4–7 последовательных дней [21, 22].

На сегодняшний день ПГ определяется как любой режим питания, включающий периоды голодания и/или сильно ограниченного потребления калорий, схема которого рассматривается в рамках дня, недели или более продолжительного периода. В связи с этим предлагаемое рядом исследователей подразделение режимов временного ограничения питания на голодание в течение дня (внутридневное голодание) и голодание в течение недели (внутринедельное голодание) представляется оправданным [1, 20, 23].

На сегодняшний день опубликовано немногим более 20 исследований различных режимов прерывистого ограничения энергии у людей, среди которых имеются как рандомизированные, так и интервенционные исследования без контрольной группы (в том числе перекрестные). Все имеющиеся на сегодняшний день исследования являются краткосрочными (от 4 дней до 16 нед) и достаточно малочисленными (от 8 до 116 участников) и включают в себя как людей с нормальной массой тела, так и пациентов с ожирением/избыточной массой тела [1].

Несмотря на положительные результаты, продемонстрированные некоторыми авторами, метаанализ библиотеки Cochrane, опубликованный в 2021 г., не подтвердил преимуществ ПОВ по сравнению с низкокалорийной диетой (НКД) в лечении ожирения и коморбидных состояний [1, 24]. В данный обзор было включено 18 рандомизированных контролируемых испытаний (1125 взрослых людей старше 18 лет с кардиометаболическими факторами риска и без них), сравнивавших ПОВ с питанием *ad libitum* (прием пищи в любое время без определенного ограничения калорийности) или с постоянным ограничением калорий (НКД). Режимы питания включали в себя традиционное голодание через день, модифицированное голодание через день, периодическое голодание и ПОВ. В 7 исследованиях сравнивали ПОВ с питанием *ad libitum*, в 8 – с НКД и в 3 – с питанием *ad libitum* и НКД при краткосрочном (≤ 3 мес) и среднесрочном (от 3 до 2 мес) наблюдении [24].

В большинстве источников проводится сравнительная оценка пищевых режимов ПОВ и НКД. Так, в метаанализе, объединившем 24 исследования ($n=1768$) диетических режимов ПГ (диета 1:1 и ее модификация, диета 5:2, ПОВ) в сравнении с НКД, изучали их сопоставимость и эффективность. Периоды диетического вмешательства варьировали от 2 до 26 нед. Compliance составила $>80\%$ в исследованиях продолжительностью до 3 мес и $<73\%$ в исследованиях более 3 мес. Возраст участников варьировал от 23 ± 1 до $68 \pm 2,7$ года, а ИМТ – от $21,7 \pm 0,8$ до $39,5 \pm 6,0$ кг/м² соответственно.

Соблюдение диеты 1:1 способствовало потере массы тела в диапазоне от 0,77 до 12,97%, диеты 5:2 – от 1,70 до 7,97%, а ПОВ – от 0,95 до 8,60%. При этом степень потери массы тела при разных вариантах диеты статистически не различалась. Кроме того, метарегрессионный анализ показал, что потеря массы тела статистически не различалась при сравнении режимов ПГ и НКД [20, 25].

В другом метаанализе, объединившем 28 рандомизированных контролируемых исследований ($n=2043$), сравнивали эффекты диет ПГ (диеты 1:1, диеты 5:2 и ПОВ) с НКД, включавшие антропометрические и кардиометаболические маркеры риска у внешне здоровых взрослых с нормальной или избыточной массой тела или ожирением. Периоды диетических вмешательств варьировали от 2 до 52 нед, средний возраст участников – от 27 до 68 лет, а средний ИМТ – от 22 до 40 кг/м². По антропометрическим данным – масса тела, окружность талии, ИМТ – не обнаружено существенных различий между воздействием диетических схем ПГ и НКД. Показатели систолического и диастолического АД значительно снизились, но существенно не различались в группах, придерживающихся диет ПГ и НКД. Ни одна из схем ПГ по отдельности по данным показателям существенно не отличалась от НКД. Анализ лабораторных данных показал, что уровни глюкозы, инсулина, индекс инсулинорезистентности, концентрации сывороточных липидов и липопротеинов не различались у лиц, придерживающихся диет ПГ и НКД [20, 26].

В метаанализе, включавшем 18 исследований ($n=1658$), изучавших эффективность диетических вмешательств в рамках прерывистого ограничения энергии и низкокалорийного питания у лиц с клинически диагностированным сахарным диабетом 2 типа, оцениваемые показатели включали массу тела, уровень гликированного гемоглобина, глюкозы крови натощак, инсулина, ИМТ, липидный профиль и АД. Исследование подтвердило, что ПОВ и НКД являются более эффективными, чем обычные диеты. Прямые сравнения показали, что ПОВ так же эффективно, как НКД, для снижения уровня гликированного гемоглобина, массы тела и ИМТ [21].

Среди возможных объяснений непостоянства результатов, полученных в клинических исследованиях режимов ПОВ, скорее всего, может лежать различие эффектов, которые оказывают раннее и позднее ПОВ, а также

неоднородность результатов, полученных при обследовании лиц с избыточной массой тела/ожирением или без них (у людей с нормальной массой тела) [1, 27, 28].

В связи с этим обсуждение метаболических эффектов ПОВ требует рассмотрения вопроса о различном влиянии раннего и позднего ПОВ. Имеющиеся на сегодня данные литературы свидетельствуют, что раннее ПОВ, когда прием пищи происходит с 8:00 до 18:00, способствует у людей с избыточной массой тела и ожирением снижению массы тела и аппетита, уровня систолического и диастолического АД и концентрации холестерина липопротеинов низкой плотности в сыворотке крови, а у пациентов с предиабетом и сахарным диабетом 2 типа этот режим питания ассоциирован с более низким уровнем инсулина и улучшением чувствительности к нему (снижением у них инсулинорезистентности) [1, 29, 30]. Данные исследования показывают, что прием пищи в начале дня является оптимальным для контроля массы тела и улучшения гликемического профиля в изокалорийных условиях, и также указывают на важность согласования приема пищи с циркадными ритмами для улучшения кардиометаболических показателей у лиц с избыточной массой тела и ожирением.

Из другого обзора данных рандомизированных контролируемых исследований следует, что соблюдение режимов ПОВ (в зависимости от продолжительности пищевого окна) создает ежедневный дефицит энергии в 200–550 ккал. Такое снижение потребления энергии приводит к легкой или умеренной потере массы тела на 3–5% в течение 2–12 мес по сравнению с контролем без вмешательства. Данные диетические вмешательства могут давать метаболические преимущества, такие как положительная динамика уровня АД и гликемии. Однако улучшения этих переменных обычно являются результатом снижения массы тела и, как правило, при достаточной потере массы тела. Также не получено убедительных данных, приводит ли раннее ПОВ к более выраженным улучшениям гликемического контроля по сравнению с поздним вариантом. Данный факт, возможно, объясняется тем, что преимущества ПОВ в плане потери массы тела перевешивают любые различия, возникающие из-за распределения калорий. В итоге отмечено, что более короткие интервалы приема пищи (4–6 ч) являются эффективной стратегией снижения массы тела, при этом более ранний прием пищи, должным образом соответствующий циркадным ритмам, может оказаться более эффективным для контроля гликемии, чем прием пищи в конце дня [31]. Похожая концепция присутствует в анализе данных исследования CALERIE, оценивающего результаты применения НКД, включающего постоянное время первого и последнего приема пищи, более короткое пищевое окно и более раннее потребление пищи как наиболее эффективное [32].

В метаанализе режимов ПОВ, включавшем 13 исследований ($n=492$), сопоставляли эффекты диет в рамках режимов раннего и позднего приема ПОВ, а также обоих режимов с группой сравнения. Изучали антропо-

метрические и кардиометаболические маркеры риска. Периоды диетических вмешательств варьировали от 4 до 14 нед, средний возраст участников – от 22,1 до 68 лет, а средний ИМТ – от 21,4 до 39,6 кг/м². Основным критерием для группы раннего приема пищи являлся первый прием пищи, который осуществлялся между 6:30 и 10:30, а для позднего – после 11:30. Окно приема пищи для ПОВ составляло 6–11 ч, для группы сравнения – более 8–15 ч.

Анализ полученных данных показал, что ПОВ, как раннее, так и позднее, эффективно снижает массу тела (соответственно на 1,9–3,3 и 1,1–2,7 кг) и систолическое АД (на 6,4–11,2 и 2,5 мм рт.ст.). Влияние на уровень глюкозы в крови натощак и липидный профиль были менее очевидными и в основном незначительными. Хотя итоговые показатели раннего ПОВ выглядели предпочтительнее позднего, но, за исключением НОМА-IR, в большинстве своем эти различия не были статистически значимыми. Поскольку в анализируемых исследованиях хронотип участников, по сути, не был включен в качестве критерия отбора, авторы считают, что степень эффективности ПОВ, вероятно, будет усилена за счет соблюдения принципов хронопитания, а также за счет оптимизации состава первого приема пищи (завтрака) для соответствия метаболическим предпочтениям циркадных часов [4].

Таким образом, несмотря на заявленные некоторыми авторами потенциальные преимущества ПОВ для здоровья, широкие рекомендации этого режима питания в настоящее время представляются не вполне обоснованными и прежде всего из-за недостаточного количества проведенных клинических испытаний, их краткосрочности, разнородности и полученных противоречи-

вых результатов [1]. Как показывают результаты многих исследований, положительные эффекты ПОВ не имеют преимуществ перед применением НКД в коррекции избыточной массы тела и кардиометаболических нарушений у лиц с ожирением. При этом внедрение ПОВ в практику здорового и лечебного питания требует строгого контроля, а также сопряжено с трудностями соблюдения временных интервалов приема пищи. Подобные ограничения в традиционном образе жизни могут мешать привычному социальному и семейному укладу и в то же время не совпадать с рабочим графиком. Наряду с этим неизвестно, как необходимость жесткого соблюдения предписанного окна питания будет влиять на пищевое поведение и психологическое здоровье, вызывая гиперфагические реакции после периодов голодания [1].

Применение ПОВ может также иметь противопоказания при различных заболеваниях, в том числе связанных с нарушением функции пищеварительной системы, приеме лекарственных препаратов и др. В связи с этим широкая рекомендация данной стратегии питания для борьбы с ожирением и коморбидными состояниями представляется преждевременной [1].

В целом результаты приведенных исследований указывают на важность режима питания, согласованного с циркадными ритмами, для улучшения кардиометаболических показателей. При этом такие аспекты, как более ранний первый прием пищи (завтрак), закрытие пищевого окна как минимум за 4 ч до начала биологического сна (в случае позднего приема пищи) и продолжительность сна, должны обязательно приниматься во внимание при назначении любых диетических вмешательств.

Сведения об авторах

Есипов Александр Владимирович (Alexander V. Esipov) – доктор медицинских наук, профессор, начальник ФГБУ «НМИЦ ВМТ им. А.А. Вишневого» Минобороны России (Красногорск, Московская область, Российская Федерация) <https://orcid.org/0000-0001-8239-539X>

Гуляев Николай Иванович (Nikolay I. Gulyaev) – доктор медицинских наук, доцент, начальник кардиологического центра – главный кардиолог ФГБУ «НМИЦ ВМТ им. А.А. Вишневого» Минобороны России (Красногорск, Московская область, Российская Федерация), профессор кафедры терапии неотложных состояний филиала ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова» Минобороны России в г. Москве, профессор кафедры госпитальной терапии с курсами эндокринологии, гематологии и клинической лабораторной диагностики ФГАОУ ВО РУДН им. Патриса Лумумбы (Москва, Российская Федерация)

E-mail: nig27@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7578-8715>

Петько Анатолий Петрович (Anatoliy P. Petko) – кандидат медицинских наук, начальник центра традиционной медицины и восстановительного лечения ФГБУ «НМИЦ ВМТ им. А.А. Вишневого» Минобороны России (Красногорск, Московская область, Российская Федерация)

Прохорчик Александр Александрович (Alexander A. Prokhorchik) – кандидат медицинских наук, главный терапевт ФГБУ «НМИЦ ВМТ им. А.А. Вишневого» Минобороны России (Красногорск, Московская область, Российская Федерация), преподаватель кафедры терапии неотложных состояний филиала ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова» (Москва, Российская Федерация)

<https://orcid.org/0000-0001-5542-3527>

Погожева Алла Владимировна (Alla V. Pogozheva) – доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (Москва, Российская Федерация)

E-mail: allapogozheva@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4619-291X>

Литература

- Берковская М.А., Гурова О.Ю., Хайкина И.А., Фадеев В.В. Питание, ограниченное по времени, как новая стратегия терапии ожирения и коморбидных состояний // Проблемы эндокринологии. 2022. Т. 68, № 4. С. 78–91. DOI: <https://doi.org/10.14341/probl13078>
- Regmi P., Heilbronn L.K. Time-restricted eating: benefits, mechanisms, and challenges in translation // iScience. 2020. Vol. 23, N 6. Article ID 101161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101161>
- Глуткин С.В., Чернышева Ю.Н., Зинчук В.В., Балбатун О.А., Орехов С.Д. Физиологическая характеристика лиц с различными хронотипами // Вестник Смоленской государственной медицинской академии. 2017. Т. 16, № 2. С. 48–58. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziologicheskaya-harakteristika-lits-s-razlichnymi-hronotipami/viewer>
- Petridi F., Geurts J.M.W., Nyakayiru J., Schaafsma A., Schaafsma D., Meex R.C.R., Singh-Povel C.M. Effects of early and late time-restricted feeding on parameters of metabolic health: an explorative literature assessment // Nutrients. 2024. Vol. 16, N 11. P. 1721. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu16111721>
- Jakubowicz D., Wainstein J., Tsameret S., Landau Z. Role of high energy breakfast «big breakfast diet» in clock gene regulation of postprandial hyperglycemia and weight loss in type 2 diabetes // Nutrients. 2021. Vol. 13, N 5. P. 1558. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu13051558>
- van der Merwe C., Münch M., Kruger R. Chronotype differences in body composition, dietary intake and eating behavior outcomes: a scoping systematic review // Adv. Nutr. 2022. Vol. 13, N 6. P. 2357–2405. DOI: <https://doi.org/10.1093/advances/nmac093>
- Palomar-Cros A., Andreeva V.A., Fezeu L.K., Julia C., Bellicha A., Kesse-Guyot E. et al. Dietary circadian rhythms and cardiovascular disease risk in the prospective NutriNet-Santé cohort // Nat. Commun. 2023. Vol. 14, N 1. P. 7899. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43444-3>
- Perrar I., Hohoff E., Lesani A., Schmitting S., Libuda L., Krueger B. et al. Circadian eating patterns track from infancy to pre- and primary school-age, but are not prospectively associated with body composition in childhood – results of the DONALD cohort study // Eur. J. Nutr. 2025. Vol. 64, N 4. P. 165. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00394-025-03673-2>
- Leung G.K.W., Huggins C.E., Ware R.S., Bonham M.P. Time of day difference in postprandial glucose and insulin responses: systematic review and meta-analysis of acute postprandial studies // Chronobiol. Int. 2020. Vol. 37, N 3. P. 311–326. DOI: <https://doi.org/10.1080/07420528.2019.1683856>
- Ren X., Yang X., Jiang H., Han T., Sun C. The association of energy and macronutrient intake at dinner vs breakfast with the incidence of type 2 diabetes mellitus in a cohort study: the China health and nutrition survey, 1997–2011 // J. Diabetes. 2021. Vol. 13, N 11. P. 882–892. DOI: <https://doi.org/10.1111/1753-0407.13185>
- Lesani A., Barkhidarian B., Jafarzadeh M., Akbarzade Z., Djafarian K., Shab-Bidar S. Time-related meal patterns and breakfast quality in a sample of Iranian adults // BMC Nutr. 2023. Vol. 9, N 1. P. 13. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40795-022-00666-w>
- Lesani A., Akbarzade Z., Karimi M., Djafarian K., Shab-Bidar S. Association of overnight fasting and meal irregularity with nutrient quality and anthropometric measures in adults // J. Nutr. Food Secur. 2024. Vol. 9, N 3. P. 423–438. DOI: <https://doi.org/10.18502/jnfs.v9i3.16152>
- Lesani A., Mojani-Qomi M.S. Cross-sectional associations between meal timing patterns and diet quality indices in Iranian women // Sci. Rep. 2025. Vol. 15. Article ID 21135. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06897-8>
- Lotti S., Pagliai G., Colombini B., Sofi F., Dinu M. Chronotype differences in energy intake, cardiometabolic risk parameters, cancer, and depression: a systematic review with meta-analysis of observational studies // Adv. Nutr. 2022. Vol. 13, N 1. P. 269–281. DOI: <https://doi.org/10.1093/advances/nmab115>
- Garaulet M., Qian J., Florez J.C., Arendt J., Saxena R., Scheer F. Melatonin effects on glucose metabolism: time to unlock the controversy // Trends Endocrinol. Metab. 2020. Vol. 31, N 3. P. 192–204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tem.2019.11.011>
- Lesani A., Djafarian K., Akbarzade Z., Janbozorgi N., Shab-Bidar S. Meal-specific dietary patterns and their contribution to habitual dietary patterns in the Iranian population // Br. J. Nutr. 2023. Vol. 129, N 2. P. 262–271. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0007114521005067>
- Lesani A., Soveid N., Clark C.C.T., Barkhidarian B., Gholami F., Mojani-Qomi M.S. Chronotype-specific associations of meal timing patterns with cardiometabolic health in women: a cross-sectional study // Nutr. Metab. (Lond.). 2025. Vol. 22, N 1. P. 96. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12986-025-00985-2>
- Naous E., Achkar A., Mitri J. Intermittent fasting and its effects on weight, glycemia, lipids, and blood pressure: a narrative review // Nutrients. 2023. Vol. 15, N 16. P. 3661. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu15163661>
- Silveira Rossi J.L., Barbalho S.M., Reverete de Araujo R., Bechara M.D., Sloan K.P., Sloan L.A. Metabolic syndrome and cardiovascular diseases: going beyond traditional risk factors // Diabetes Metab. Res. Rev. 2022. Vol. 38. P. e3502. DOI: <https://doi.org/10.1002/dmrr.3502>
- Есипов А.В., Гуляев Н.И., Петько А.П., Прохорчик А.А., Мироненко Д.А., Худзиев Б.Г. и др. Разгрузочно-диетическая терапия и прерывистое голодание как единая лечебно-профилактическая стратегия возраст-ассоциированных заболеваний человека // Клиническая медицина. 2025. Т. 103, № 3. С. 169–180. DOI: <https://doi.org/10.30629/0023-2149-2025-103-3-169-180>
- Zeng X., Ji Q.P., Jiang Z.Z., Xu Y. The effect of different dietary restriction on weight management and metabolic parameters in people with type 2 diabetes mellitus: a network meta-analysis of randomized controlled trials // Diabetol. Metab. Syndr. 2024. Vol. 16, N 1. P. 254. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13098-024-01492-9>
- Li C., Sadraie B., Steckhan N., Kessler C., Stange R., Jeitler M. et al. Effects of a one-week fasting therapy in patients with Type-2 diabetes Mellitus and metabolic syndrome – a randomized controlled explorative study // Exp. Clin. Endocrinol. Diabetes. 2017. Vol. 125, N 9. P. 618–624. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-0043-101700>
- Aragon A.A., Schoenfeld B.J. Does timing matter? A narrative review of intermittent fasting variants and their effects on bodyweight and body composition // Nutrients. 2022. Vol. 14, N 23. P. 5022. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu14235022>
- Allaf M., Elghazaly H., Mohamed O.G., Faren M.F.K., Zaman S., Salmasi A.M. et al. Intermittent fasting for the prevention of cardiovascular disease // Cochrane Database Syst. Rev. 2021. Vol. 1, N 1. CD013496. DOI: <https://doi.org/10.1002/14651858.CD013496.pub2>
- Elortegui Pascual P., Rolands M.R., Eldridge A.L., Kassis A., Mainardi F., Lê K.A. et al. A meta-analysis comparing the effectiveness of alternate day fasting, the 5:2 diet, and time-restricted eating for weight loss // Obesity. 2023. Vol. 31, suppl. 1. P. 9–21. DOI: <https://doi.org/10.1002/oby.23568>
- Schroor M.M., Joris P.J., Plat J., Mensink R.P. Effects of intermittent energy restriction compared with those of continuous energy restriction on body composition and cardiometabolic risk markers – a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials in adults // Adv. Nutr. 2024. Vol. 15, N 1. Article ID 100130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advnut.2023.10.003>
- Charlot A., Hutt F., Sabatier E., Zoll J. Beneficial effects of early time restricted feeding on metabolic diseases: importance of aligning food habits with the circadian clock // Nutrients. 2021. Vol. 13, N 5. P. 1405. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu13051405>
- Moon S., Kang J., Kim S.H., Chung H.S., Kim Y.J., Yu J.M. et al. Beneficial effects of time-restricted eating on metabolic diseases: a systematic review and meta-analysis // Nutrients. 2020. Vol. 12, N 5. P. 1267. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu12051267>
- Hutchison A.T., Regmi P., Manoogian E.N.C., Fleischer J.G., Wittert G.A., Panda S. et al. Time-restricted feeding improves glucose tolerance in men at risk for type 2 diabetes: a randomized crossover trial // Obesity (Silver Spring). 2019. Vol. 27, N 5. P. 724–732. DOI: <https://doi.org/10.1002/oby.22449>
- Cienfuegos S., Gabel K., Kalam F., Ezpeleta M., Wiseman E., Pavlou V. et al. Effects of 4- and 6-h time-restricted feeding on weight and cardiometabolic health: a randomized controlled trial in adults with obesity // Cell Metab. 2020. Vol. 32, N 3. P. 366–378.e3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2020.06.018>
- Ezpeleta M., Cienfuegos S., Lin S., Pavlou V., Gabel K., Tussing-Humphreys L. et al. Time-restricted eating: Watching the clock to treat obesity // Cell Metab. 2024. Vol. 36, N 2. P. 301–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2023.12.004>
- Fleischer J.G., Das S.K., Bhaskar M., Manoogian E.N.C., Panda S. Associations between the timing of eating and weight-loss in calorically restricted healthy adults: findings from the CALERIE study // Exp. Gerontol. 2022. Vol. 165. Article ID 111837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exger.2022.111837>

References

- Berkovskaya M.A., Gurova O.Y., Khaykina I.A., Fadeev V.V. Time-restricted eating as a novel strategy for treatment of obesity and its comorbid conditions. *Problemy endokrinologii* [Problems of Endocrinology]. 2022; 68 (4): 78–91. DOI: <https://doi.org/10.14341/probl13078> (in Russian)
- Regmi P., Heilbronn L.K. Time-restricted eating: benefits, mechanisms, and challenges in translation. *iScience*. 2020; 23(6): 101161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101161>
- Glutkin S.V., Chernyshova J.N., Zinchuk V.V., Balbatun O.A., Orekhov S.D. Physiological characteristics of persons with different chronotypes. *Vestnik Smolenskoy gosudarstvennoy meditsinskoy akademii* [Bulletin of the Smolensk State Medical Academy]. 2017; 16 (2): 48–58. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziologicheskaya-harakteristika-lits-s-razlichnymi-hronotipami/viewer> (in Russian)
- Petridi F., Geurts J.M.W., Nyakayiru J., Schaafsma A., Schaafsma D., Meex R.C.R., Singh-Povel C.M. Effects of early and late time-restricted feeding on parameters of metabolic health: an explorative literature assessment. *Nutrients*. 2024; 16 (11): 1721. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu16111721>
- Jakubowicz D., Wainstein J., Tsameret S., Landau Z. Role of high energy breakfast «big breakfast diet» in clock gene regulation of postprandial hyperglycemia and weight loss in type 2 diabetes. *Nutrients*. 2021; 13(5): 1558. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu13051558>
- van der Merwe C., Münch M., Kruger R. Chronotype differences in body composition, dietary intake and eating behavior outcomes: a scoping systematic review. *Adv Nutr*. 2022; 13 (6): 2357–405. DOI: <https://doi.org/10.1093/advances/nmac093>
- Palomar-Cros A., Andreeva V.A., Fezeu L.K., Julia C., Bellicha A., Kesse-Guyot E., et al. Dietary circadian rhythms and cardiovascular disease risk in the prospective NutriNet-Santé cohort. *Nat Commun*. 2023; 14 (1): 7899. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43444-3>
- Perrar I., Hohoff E., Lesani A., Schmitting S., Libuda L., Krueger B., et al. Circadian eating patterns track from infancy to pre- and primary school-age, but are not prospectively associated with body composition in childhood – results of the DONALD cohort study. *Eur J Nutr*. 2025; 64 (4): 165. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00394-025-03673-2>
- Leung G.K.W., Huggins C.E., Ware R.S., Bonham M.P. Time of day difference in postprandial glucose and insulin responses: systematic review and meta-analysis of acute postprandial studies. *Chronobiol Int*. 2020; 37 (3): 311–26. DOI: <https://doi.org/10.1080/07420528.2019.1683856>
- Ren X., Yang X., Jiang H., Han T., Sun C. The association of energy and macronutrient intake at dinner vs breakfast with the incidence of type 2 diabetes mellitus in a cohort study: the China health and nutrition survey, 1997–2011. *J Diabetes*. 2021; 13 (11): 882–92. DOI: <https://doi.org/10.1111/1753-0407.13185>
- Lesani A., Barkhidarian B., Jafarzadeh M., Akbarzade Z., Djafarian K., Shab-Bidar S. Time-related meal patterns and breakfast quality in a sample of Iranian adults. *BMC Nutr*. 2023; 9 (1): 13. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40795-022-00666-w>
- Lesani A., Akbarzade Z., Karimi M., Djafarian K., Shab-Bidar S. Association of overnight fasting and meal irregularity with nutrient quality and anthropometric measures in adults. *J Nutr Food Secur*. 2024; 9 (3): 423–38. DOI: <https://doi.org/10.18502/jnfs.v9i3.16152>
- Lesani A., Mojani-Qomi M.S. Cross-sectional associations between meal timing patterns and diet quality indices in Iranian women. *Sci Rep*. 2025; 15: 21135. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06897-8>
- Lotti S., Pagliai G., Colombini B., Sofi F., Dinu M. Chronotype differences in energy intake, cardiometabolic risk parameters, cancer, and depression: a systematic review with meta-analysis of observational studies. *Adv Nutr*. 2022; 13 (1): 269–81. DOI: <https://doi.org/10.1093/advances/nmac115>
- Garaulet M., Qian J., Florez J.C., Arendt J., Saxena R., Scheer F. Melatonin effects on glucose metabolism: time to unlock the controversy. *Trends Endocrinol Metab*. 2020; 31 (3): 192–204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tem.2019.11.011>
- Lesani A., Djafarian K., Akbarzade Z., Janbozorgi N., Shab-Bidar S. Meal-specific dietary patterns and their contribution to habitual dietary patterns in the Iranian population. *Br J Nutr*. 2023; 129 (2): 262–71. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0007114521005067>
- Lesani A., Soveid N., Clark C.C.T., Barkhidarian B., Gholami F., Mojani-Qomi M.S. Chronotype-specific associations of meal timing patterns with cardiometabolic health in women: a cross-sectional study. *Nutr Metab (Lond)*. 2025; 22 (1): 96. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12986-025-00985-2>
- Naous E., Achkar A., Mitri J. Intermittent fasting and its effects on weight, glycemia, lipids, and blood pressure: a narrative review. *Nutrients*. 2023; 15 (16): 3661. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu15163661>
- Silveira Rossi J.L., Barbalho S.M., Reverete de Araujo R., Bechara M.D., Sloan K.P., Sloan L.A. Metabolic syndrome and cardiovascular diseases: going beyond traditional risk factors. *Diabetes Metab Res Rev*. 2022; 38: e3502. DOI: <https://doi.org/10.1002/dmrr.3502>
- Esipov A.V., Gulyaev N.I., Pet'ko A.P., Prokhorchik A.A., Mironenko D.A., Khudziev B.G., et al. Fasting-dietary therapy and intermittent fasting as a unified treatment and preventive strategy for age-associated human diseases. *Klinicheskaya meditsina* [Clinical Medicine]. 2025; 103 (3): 169–80. DOI: <https://doi.org/10.30629/0023-2149-2025-103-3-169-180> (in Russian)
- Zeng X., Ji Q.P., Jiang Z.Z., Xu Y. The effect of different dietary restriction on weight management and metabolic parameters in people with type 2 diabetes mellitus: a network meta-analysis of randomized controlled trials. *Diabetol Metab Syndr*. 2024; 16 (1): 254. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13098-024-01492-9>
- Li C., Sadraie B., Steckhan N., Kessler C., Stange R., Jeitler M., et al. Effects of a one-week fasting therapy in patients with Type-2 diabetes Mellitus and metabolic syndrome – a randomized controlled explorative study. *Exp Clin Endocrinol Diabetes*. 2017; 125 (9): 618–24. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-0043-101700>
- Aragon A.A., Schoenfeld B.J. Does timing matter? A narrative review of intermittent fasting variants and their effects on bodyweight and body composition. *Nutrients*. 2022; 14 (23): 5022. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu14235022>
- Allaf M., Elghazaly H., Mohamed O.G., Fareen M.F.K., Zaman S., Salmasi A.M., et al. Intermittent fasting for the prevention of cardiovascular disease. *Cochrane Database Syst Rev*. 2021; 1 (1): CD013496. DOI: <https://doi.org/10.1002/14651858.CD013496.pub2>
- Elortegui Pascual P., Rolands M.R., Eldridge A.L., Kassir A., Mainardi F., Lê K.A., et al. A meta-analysis comparing the effectiveness of alternate day fasting, the 5:2 diet, and time-restricted eating for weight loss. *Obesity*. 2023; 31 (suppl 1): 9–21. DOI: <https://doi.org/10.1002/oby.23568>
- Schroor M.M., Joris P.J., Plat J., Mensink R.P. Effects of intermittent energy restriction compared with those of continuous energy restriction on body composition and cardiometabolic risk markers – a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials in adults. *Adv Nutr*. 2024; 15 (1): 100130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advnut.2023.10.003>
- Charlot A., Hutt F., Sabatier E., Zoll J. Beneficial effects of early time restricted feeding on metabolic diseases: importance of aligning food habits with the circadian clock. *Nutrients*. 2021; 13 (5): 1405. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu13051405>
- Moon S., Kang J., Kim S.H., Chung H.S., Kim Y.J., Yu J.M., et al. Beneficial effects of time-restricted eating on metabolic diseases: a systematic review and meta-analysis. *Nutrients*. 2020; 12 (5): 1267. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu12051267>
- Hutchison A.T., Regmi P., Manoogian E.N.C., Fleischer J.G., Wittert G.A., Panda S., et al. Time-restricted feeding improves glucose tolerance in men at risk for type 2 diabetes: a randomized crossover trial. *Obesity (Silver Spring)*. 2019; 27 (5): 724–32. DOI: <https://doi.org/10.1002/oby.22449>
- Cienfuegos S., Gabel K., Kalam F., Ezpeleta M., Wiseman E., Pavlou V., et al. Effects of 4- and 6-h time-restricted feeding on weight and cardiometabolic health: a randomized controlled trial in adults with obesity. *Cell Metab*. 2020; 32 (3): 366–78.e3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2020.06.018>
- Ezpeleta M., Cienfuegos S., Lin S., Pavlou V., Gabel K., Tussing-Humphreys L., et al. Time-restricted eating: Watching the clock to treat obesity. *Cell Metab*. 2024; 36 (2): 301–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2023.12.004>
- Fleischer J.G., Das S.K., Bhapkar M., Manoogian E.N.C., Panda S. Associations between the timing of eating and weight-loss in calorically restricted healthy adults: findings from the CALERIE study. *Exp Gerontol*. 2022; 165: 111837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exger.2022.111837>

Для корреспонденции

Кравцов Александр Анатольевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории проблем распределения стабильных изотопов в живых системах ЮНЦ РАН, лаборант отдела биологически активных веществ ФГБОУ ВО «КубГУ», старший научный сотрудник экспериментальной клиники-лаборатории биологически активных веществ животного происхождения ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова»
 Адрес: 350040, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Ставропольская, д. 149
 Телефон: (903) 449-44-85
 E-mail: aakravtsov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2462-577X>

Козин С.В.^{1, 2}, Сигарева А.С.³, Моисеев А.В.⁴, Козлова Е.А.², Рубайло А.Д.², Кравцов А.А.^{1, 2, 5}

Влияние питьевого рациона с повышенным содержанием дейтерия на микробиом кишечника и антиоксидантный статус организма крыс

Drinking with increased deuterium content affects the gut microbiome and the antioxidant status of the organism

Kozin S.V.^{1, 2}, Sigareva A.S.³,
 Moiseev A.V.⁴, Kozlova E.A.²,
 Rubailo A.D.², Kravtsov A.A.^{1, 2, 5}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», 344006, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет», 350040, г. Краснодар, Российская Федерация

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет», 350072, г. Краснодар, Российская Федерация

⁴ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», 350044, г. Краснодар, Российская Федерация

⁵ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» Российской академии наук, 109316, г. Москва, Российская Федерация

¹ Federal Research Center "The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences", 344006, Rostov-on-Don, Russian Federation

² Kuban State University, 350040, Krasnodar, Russian Federation

³ Kuban State Technological University, 350072, Krasnodar, Russian Federation

⁴ Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 350044, Krasnodar, Russian Federation

⁵ V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, 109316, Moscow, Russian Federation

Финансирование. Исследование проведено в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН на 2025 г., № гос. рег. 125011700394-5.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Концепция и дизайн исследования – Козин С.В., Кравцов А.А.; сбор и обработка материала – Сигарева А.С., Рубайло А.Д., Козлова Е.А.; написание текста – Козин С.В., Кравцов А.А.; редактирование – Моисеев А.В.; утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи – все авторы.

Для цитирования: Козин С.В., Сигарева А.С., Моисеев А.В., Козлова Е.А., Рубайло А.Д., Кравцов А.А. Влияние питьевого рациона с повышенным содержанием дейтерия на микробиом кишечника и антиоксидантный статус организма крыс // Вопросы питания. 2025. Т. 94, № 6. С. 15–27. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-15-27>

Статья поступила в редакцию 31.08.2025. **Принята в печать** 20.10.2025.

В свете подготовки в данный момент пилотируемой миссии на Марс крайне актуально понимать характер влияния на организм млекопитающих питьевого рациона с концентрацией дейтерия, соответствующей его уровню во льдах на Марсе.

Цель работы – оценить динамику содержания дейтерия в организме экспериментальных животных и изменения в окислительных процессах при ежедневном приеме питьевого рациона с концентрацией дейтерия 6704‰.

Материал и методы. Эксперименты были выполнены на крысах-самцах линии Вистар с исходной массой тела 270–300 г. Реакцию организма на повышение концентрации дейтерия исследовали на 60 животных, которых разделили на 2 равные группы: 1-я группа – крысы потребляли питьевой рацион с концентрацией дейтерия, соответствующей природному уровню (–37‰); 2-я группа – с концентрацией дейтерия 6704‰. Из эксперимента выводили по 5 животных на 5, 8, 11, 16, 21 и 31-е сутки с отбором кала, крови и головного мозга. Исследование стресс-протекторной активности питьевого рациона с модифицированным изотопным составом было проведено на 3 группах крыс (по 7 в каждой). Группа «Контроль, –37‰» – животные потребляли воду с концентрацией дейтерия –37‰; животные группы «Стресс, –37‰» и «Стресс, 6704‰» в течение 38 сут потребляли воду с концентрацией дейтерия соответственно –37 и 6704‰ при моделировании иммобилизационного стресса (4 ч) в течение 3 сут начиная с 33-х. Содержание дейтерия в воде и сыворотке крови определяли методом сравнения с эталоном с помощью ЯМР-спектрометра (Bruker Avance NEO 700 МГц), в лиофилизированных тканях коры головного мозга – с использованием изотопного масс-спектрометра (DELTA V Advantage). Активность свободнорадикальных процессов оценивали по интенсивности хемилюминесценции плазмы крови и супернатанта тканей коры головного мозга, в головном мозге определяли активность каталазы спектрофотометрически, уровень экспрессии генов – с помощью полимеразной цепной реакции (ПЦР) в реальном времени. Соотношение доминантных филумов бактерий в кишечном микробиоме оценивали с помощью ПЦР с филум-специфичными праймерами к 16S рРНК.

Результаты и обсуждение. Потребление воды с концентрацией дейтерия 6704‰ в течение 31 дня вызывало увеличение его концентрации в плазме крови крыс с -25 ± 4 до 4425 ± 103 ‰, а в тканях головного мозга содержание дейтерия увеличилось с -127 ± 7 до 667 ± 32 ‰. При накоплении дейтерия в организме в коре головного мозга происходило повышение активности каталазы (в 2,2–5,3 раза с 8-х по 31-е сутки, $p < 0,05$), изменение уровня экспрессии ряда генов (Cat, Gclc, Nrf2), обеспечивающих антиоксидантную защиту. Выявлены колебания численности микробиома кишечника, особенно заметные на 5-е и 8-е сутки эксперимента в виде снижения представленности Bacteroides (на 13 и 22%) и роста Firmicutes (на 12 и 16%). Установленные эффекты являются результатом адаптационных реакций на стресс, вызванный повышением концентрации дейтерия во внутренней среде организма. Снижение интенсивности окислительного стресса в тканях головного мозга и крови крыс после перенесенного иммобилизационного стресса обусловлено длительным поступлением воды с концентрацией дейтерия 6704‰ в организм и развитием эффекта перекрестной адаптации.

Заключение. Повышение содержания дейтерия в жидкостях и тканях организма экспериментальных животных обуславливает возникновение стрессовой реакции с включением механизмов адаптации, что сопровождается усилением протекторных свойств организма при иммобилизационном стрессе.

Ключевые слова: дейтерий; микробиом кишечника; иммобилизационный стресс; антиоксидантный статус; адаптация; крысы

As preparations for a manned mission to Mars are currently underway, it is crucial to understand the impact of a drinking ration with a deuterium level corresponding to those found in Martian glaciers on mammals.

The objective of the research was to study the dynamics of deuterium levels in laboratory animals and changes in oxidative processes following daily consumption of a drinking ration with a deuterium concentration of 6704‰.

Material and methods. The experiments were conducted on male Wistar rats, which had an initial body weight 270–300 g. The response of laboratory animals to increased deuterium level was studied using 60 Wistar rats. The animals were divided into two groups (30 rats each): Group 1 consumed a drinking ration with a deuterium concentration corresponding to the natural level (–37‰); Group 2 consumed a drinking ration containing 6704‰ deuterium. Five animals were removed from the experiment on days 5, 8, 11, 16, 21 and 31. Fecal, blood and brain samples were collected during these procedures. The stress-protective activity of the drinking ration with a modified isotopic composition was studied using 3 groups of rats (7 rats each). The «Control, –37‰» group consumed water with a deuterium concentration of –37‰. Animals of the «Stress, –37‰» and «Stress, 6704‰» groups consumed water with a deuterium concentration of –37‰ and 6704‰, respectively, for 38 days while simulating immobilization stress (4 hours) for 3 days, starting from the 33rd day. Deuterium level in water and blood serum was determined on a NMR spectrometer (Bruker Avance NEO 700 MHz). A DELTA V Advantage isotope mass spectrometer was used to assess deuterium level in lyophilized cerebral cortex. The activity of free radical processes was assessed by the intensity of chemiluminescence of blood plasma and cerebral cortex supernatant. Catalase activity in the cerebral cortex was measured by spectrophotometry, and gene expression levels were determined using real-time polymerase chain reaction (PCR). The proportion of dominant bacterial phyla in the intestinal microbiome was assessed using polymerase chain reaction with phylum-specific primers to 16S rRNA.

Funding. The study was conducted within the framework of the State Task of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences for 2025 (state registration number 125011700394-5).

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Contribution. Study concept and design – Kozin S.V., Kravtsov A.A.; data collection and processing – Sigareva A.S., Rubailo A.D., Kozlova E.A.; writing the text – Kozin S.V., Kravtsov A.A.; editing – Moiseev A.V.; approval of the final version of the article and responsibility for the integrity of all parts of the article – all authors.

For citation: Kozin S.V., Sigareva A.S., Moiseev A.V., Kozlova E.A., Rubailo A.D., Kravtsov A.A. Drinking with increased deuterium content affects the gut microbiome and the antioxidant status of the organism. Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]. 2025; 94 (6): 15–27. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-15-27> (in Russian)

Received 31.08.2025. **Accepted** 20.10.2025

Results. Consuming water with a deuterium concentration of 6704‰ for 31 days increased its concentration in rat blood plasma from -25 ± 4 to 4425 ± 103 ‰, while in brain tissue, deuterium content increased from -127 ± 7 to 667 ± 32 ‰. As deuterium accumulated in the body, catalase activity increased (2.2–5.3 fold from the 8th to the 31st day, $p < 0.05$) and the expression of several genes involved in antioxidant protection (Cat, Gclc, Nrf2) changed. Fluctuations in the composition of the intestinal microbiome were observed, especially on the 5th and 8th days of the experiment. These fluctuations resulted in a decrease in Bacteroides by 13 and 22%, respectively, and an increase in Firmicutes by 12 and 16%, respectively. These effects are the result of adaptive responses to stress caused by increased deuterium concentrations in the body's internal environment. The decrease in the intensity of oxidative stress in rat brain and blood after immobilization stress is due to the prolonged intake of water with a deuterium level of 6704‰ and the development of a cross-adaptation effect.

Conclusion. It has been established that increased deuterium levels in the body fluids and tissues of laboratory animals trigger a stress response, activating mechanisms for adaptation to new conditions. This results in activation of the antioxidant system, which enhances the body's protective properties during immobilization stress.

Keywords: deuterium; intestinal microbiome; immobilization stress; antioxidant status; adaptation; rats

Содержание дейтерия в природных водах нашей планеты различается в зависимости от места их нахождения и происхождения [1]. Оно колеблется в диапазоне от -429 до 40‰, при этом считается, что океаническая вода содержит 0‰ дейтерия [2]. Это отражается на содержании дейтерия во фруктах и овощах, выращенных в различных регионах [3]. Известно, что на планете Марс концентрация стабильного изотопа водорода дейтерия колеблется в зависимости от локализации от ~-5 до ~7000‰ [4].

Изменения концентрации дейтерия в питьевом рационе, даже в небольшом диапазоне, могут отражаться на интенсивности биохимических процессов [5], приводить к активации [6–8] и ингибированию [7, 9, 10] различных процессов. Изотопные эффекты в организме млекопитающих могут проявляться как при снижении [11–13], так и при повышении [14] концентрации дейтерия во внутренней среде. При длительном употреблении питьевого рациона с концентрацией дейтерия ниже природного уровня у экспериментальных животных происходит снижение его концентрации в плазме крови, тканях печени, почек и сердца [15]. Подобные колебания изотопного состава во внутренней среде организма могут приводить к увеличению активности гуморальных и клеточных защитных систем за счет эффекта преадаптации. Изотопный $^2\text{H}/^1\text{H}$ обмен возможен в -ОН, -NH, -SH-группах, имеющих свободные неподеленные пары электронов, и в низкомолекулярных соединениях, способных к образованию водородных связей [16, 17]. Изотопные эффекты могут быть связаны не только с эффектом преадаптации, но и с $^2\text{H}/^1\text{H}$ -заменами в активных и аллостерических центрах ферментов [1, 18], что приводит к модификации их термодинамических и кинетических параметров [19, 20]. В нескольких работах описан механизм реализации изотопных эффектов в живых системах за счет изменений в электрон-транспортной цепи митохондрий [21, 22]. Ранее нами было установлено, что при потреблении питьевого рациона с концентрацией дейтерия 3815‰ в течение 2 мес наблюдается повышение его концентрации в крови экспериментальных животных с -37 до 2127‰. Это обуславливает увеличение антиоксидантного потенциала в тканях печени и снижение интенсивности свободнорадикальных процессов в крови и гепатоцитах [11]. В условиях актив-

ной подготовки пилотируемой миссии на Марс крайне важно понимать, какое влияние питьевой рацион с повышенным содержанием дейтерия относительно земного уровня будет оказывать на организм млекопитающих.

Цель работы – исследование динамики содержания дейтерия в организме экспериментальных животных и изменений в окислительных процессах при ежедневном приеме питьевого рациона с концентрацией дейтерия 6704‰.

Материал и методы

Животные, модель стресса и дизайн эксперимента

Эксперименты были выполнены на крысах-самцах линии Вистар, возраст которых составлял 3 мес, масса тела 270–300 г. В каждой клетке (размеры: 300×400×150 мм) содержали по 6 животных в помещении с ламинарным потоком воздуха, при температуре 22 ± 1 °C и относительной влажности $55 \pm 10\%$, при естественном освещении. Пища и вода были доступны *ad libitum*. Все манипуляции проводили между 09:00 и 16:00 ч.

Исследование реакции организма на поступление дейтерия было выполнено на 60 крысах. Животные были разделены на 2 равные группы: 1-я группа ($n=30$) – крысы потребляли питьевой рацион с концентрацией дейтерия, соответствующей природному уровню (-37‰); 2-я группа ($n=30$) – с концентрацией дейтерия 6704‰.

Из эксперимента выводили по 5 животных на 5, 8, 11, 16, 23 и 31-е сутки. В эти дни производили отбор кала и крови, а также извлекали головной мозг после декапитации. Кал использовали для оценки микробиома кишечника. Кровь использовали для приготовления плазмы и сыворотки. Изотопное $^2\text{H}/^1\text{H}$ соотношение исследовали в сыворотке, а в плазме крови определяли интенсивность процессов свободнорадикального окисления. Кору головного мозга извлекали на холоде, замораживали в жидком азоте и использовали для последующих анализов: определения интенсивности хемилюминесценции, активности каталазы, уровня экспрессии генов (анализ методом полимеразной цепной реакции – ПЦР).

Исследование стресс-протекторной активности питьевого рациона с модифицированным изотопным соста-

вом было проведено на 3 группах крыс линии Вистар (по 7 в каждой):

- группа «Контроль, -37‰» – животные потребляли воду с концентрацией дейтерия -37‰;
- группа «Стресс, -37‰» – крысы потребляли воду с концентрацией дейтерия -37‰ в течение 32 сут перед моделированием иммобилизационного стресса и до окончания эксперимента;
- группа «Стресс, 6704‰» – потребляли воду с концентрацией дейтерия 6704‰ в течение 32 дней перед моделированием иммобилизационного стресса и до окончания эксперимента.

Иммобилизационный стресс, широко используемый метод моделирования острого стресса, заключается не только в физическом обездвиживании, но и в создании сильного эмоционального напряжения вследствие того, что подопытное животное не может избежать угрозы. Меняя продолжительность обездвиживания, можно изучать, как организм реагирует на стресс разной интенсивности. Иммобилизационный стресс моделировали на 33-и сутки эксперимента. Животных фиксировали на спине, привязывая конечности, чтобы крыса оставалась в неподвижном положении. Процедуру стресса проделывали ежедневно по 4 ч в течение 3 сут. Ежедневно осуществляли контроль за животными, осматривая конечности.

На 38-е сутки животных выводили из эксперимента, осуществляли забор крови и изъятие головного мозга. В плазме крови оценивали интенсивность окислительных процессов, происходящих в организме. После отделения кору головного мозга хранили в жидком азоте. Для изучения интенсивности процессов свободнорадикального окисления супернатант из тканей головного мозга готовили на холоде.

Эксперименты проводили в соответствии с требованиями Руководства по уходу и использованию лабораторных животных, Директивы Европейского сообщества 2010/63/EU и Руководства по работе с лабораторными животными, включая этические принципы проведения испытаний на животных (принцип 3R) ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН», в котором исследование одобрено биоэтической комиссией (протокол № 7/2023 от 07.03.2023).

Определение содержания дейтерия в крови

Концентрацию дейтерия в воде и сыворотке крови определяли методом сравнения с эталоном с помощью ЯМР-спектрометра Bruker Avance NEO 700 МГц [23] в центре коллективного пользования НОРЦ «Фармация» РУДН.

Определение содержания дейтерия в тканях головного мозга

Изотопное $^2\text{H}/^1\text{H}$ соотношение в лиофилизированных тканях головного мозга определяли на изотопном масс-спектрометре DELTA V Advantage, который был совмещен с элементным анализатором Flash 2000 (Thermo Fisher Scientific, США) и оснащен пиролизическим реактором. Образцы массой 240–280 мкг гомогенизировали и помещали в серебряные капсулы, после чего их пере-

носили в автосэмплер элементного анализатора Flash 2000. После попадания в пиролизический реактор, температура в котором составляла 1350 °С, капсула сгорала в потоке гелия марки-6.0 (90 мл/мин). Выделенный при пиролизе водород по капилляру попадал в масс-спектрометр DELTA V Advantage через систему газораспределения Conflo II.

Хемилюминесцентный анализ

Интенсивность свободнорадикальных процессов в крови и тканях головного мозга животных оценивали с использованием хемилюминометра Lum-100 (Россия) по светосумме (в условных единицах). Хемилюминесценцию (ХЛ) плазмы крови (0,1 см³ плазмы + 0,8 см³ фосфатного буфера, pH 7,4) возбуждали введением 0,1 см³ 0,3% пероксида водорода. Инициацию свечения супернатанта коры головного мозга (0,2 см³ супернатанта + 2,8 см³ фосфатного буфера), полученного путем добавления к 100 мг растертой в ступке ткани, охлажденной жидким азотом, 1 см³ фосфатного буфера, встряхивания в течение 15 мин и последующего центрифугирования в течение 10 мин при 4000 g, вызывали при помощи введения 30 мкм³ 35 мМ ионов Fe²⁺ в виде раствора сульфата железа (II). Полученные результаты представляли в виде процентов от контрольного образца.

Активность каталазы

Активность каталазы в супернатанте коры головного мозга определяли спектрофотометрически [24] по скорости убывания в среде инкубации перекиси водорода, которая при взаимодействии с молибдатом аммония образует стойкий окрашенный комплекс ($\lambda=410$ нм). Активность каталазы пропорциональна разности оптической плотности холостой и опытной пробы, выражали в мКат/г белка; результаты представляли в процентах от контроля.

Состав кишечного микробиома

Соотношение доминантных филумов бактерий в кишечном микробиоме оценивали с помощью ПЦР с филум-специфичными праймерами к 16s рРНК. Последовательности праймеров представлены в табл. 1.

Количественный ПЦР-анализ осуществлялся на термоциклере CFX96™ Real-Time System (Bio-Rad, США) с использованием набора qPCRmix-HS SYBR («Евроген», Россия). Условия реакции были следующими: общая денатурация при 94 °С 5 мин, далее 35 циклов: денатурация при 94 °С в течение 10 с, отжиг праймеров при 55 °С 10 с, элонгация при 72 °С 15 с. Количественное соотношение каждого филума рассчитывали по формуле:

$$\text{Количество бактерий} = \frac{(E_{\text{универсал}})^{Cq_{\text{универсал}}}}{(E_{\text{специфич}})^{Cq_{\text{специфич}}}} \times 100,$$

где E – эффективность ПЦР.

Уровень экспрессии генов

Выделение нуклеиновых кислот из лиофилизированных тканей коры головного мозга производили с помо-

Таблица 1. Последовательности праймеров для оценки бактериального состава кишечного микробиома с помощью полимеразной цепной реакции в реальном времени**Table 1.** Primer sequences for assessing the bacterial composition of the gut microbiome using real-time polymerase chain reaction

Бактерии / <i>Bacteria</i>	Прямой праймер 5'-3' / <i>Direct primer 5'-3'</i>	Обратный праймер 5'-3' / <i>Reverse primer 5'-3'</i>
Универсальный 16s	AAACTCAAAGGATGACGG	CTCACRRACGAGCTGAC
<i>Epsilonproteobacteria</i>	TAGGCTTGACATTGATAGAATC	CTTACGAAGGCAGTCTCCTTA
<i>Actinobacteria</i>	TGTAGCGGTGGAATGCGC	AATTAAGCCACATGCTCCGCT
<i>Bacteroidetes</i>	GTTTAATTCGATGATACGCGAG	TTAASCCGACACCTCACGG
<i>Verrucomicrobia</i>	TCAKGTGAGTATGCCCTTAT	CAGTTTTYAGGATTTCTCCGCC
<i>Firmicutes</i>	GGAGYATGTGGTTAATCGAAGCA	AGCTGACGACAACCATGCAC
<i>Betaproteobacteria</i>	AACGCGAAAAACCTTACCTACC	TGCCCTTTCTGATAGCAACTAGTG
<i>Delta- и Gamma-proteobacteria</i>	GCTAACGCATTAAGTRYCCCG	GCCATGCRGCACCTGTCT
<i>Tenericutes</i>	ATGTGTAGCGGTAAATGCGTAA	CMTACTTGGTACGTACTACT
<i>Saccharibacteria</i>	AAGAGAACTGTGCCTTCGG	GCGTAAGGGAATACTAGACC
<i>Deferribacteres</i>	CTATTCCAGTTGCTAACGG	GAGHTGCTTCCCTCTGATTATG

щью различных коммерческих наборов: ДНК – с помощью набора «Проба-ГС» («ДНК-технология», Россия); РНК – с помощью ExtractRNA («Евроген», Россия) – монофазного водного раствора фенола и гуанидин-изотиоцианата с дальнейшим добавлением хлороформа для разделения фаз и изопропилового спирта для преципитации РНК. Качественный анализ выделенных образцов нуклеиновых кислот, а также продуктов ПЦР проводили с помощью гель-электрофореза в 2% агарозном геле с 1х TAE буфером.

Для обратной транскрипции использовали изолированную РНК и коммерческий набор REVERTA-L (AmpliSens, Россия) согласно прилагаемому протоколу. Количественный ПЦР-анализ осуществлялся на термоциклере CFX96™ Real-Time System (Bio-Rad, США) с использованием набора qPCRMix-HS SYBR («Евроген», Россия). Нормализованный уровень экспрессии рассчитывали по формуле $2^{(-\Delta\Delta C_q)}$. Для обработки результатов использовали стандартное ПО Bio-Rad CFX Manager (версия 2.1). В качестве референсов использовался ген *Gapdh*.

Статистическая обработка

Для статистического анализа данных был применен пакет Statistica 10. В исследовании использовали следующие непараметрические методы: *H*-критерий Краскала–Уоллиса – для сравнения медиан в независимых группах; *U*-критерий Манна–Уитни – для оценки значимости различий между двумя независимыми малыми выборками; *W*-критерий Вилкоксона – для выявления различий между двумя малыми выборками с парными (связанными) измерениями. Статистически значимыми считали различия при уровне $p < 0,05$.

Результаты

Содержание дейтерия в плазме крови и коре головного мозга

Результаты, полученные методом изотопной масс-спектрометрии, представлены в табл. 2. В 0-й день, до начала приема питьевого рациона с повышенным

относительно природного уровня содержанием ^2H его концентрация в сыворотке крови составила $25 \pm 4\%$. У животных 2-й группы и группы «Стресс, 6704‰» наблюдали стабильное повышение концентрации ^2H в сыворотке крови. На 5-й день эксперимента концентрация дейтерия в сыворотке увеличилась на 125%. Повышение концентрации дейтерия в крови происходило до 23-го дня (превышение контрольного значения составило 468%). Концентрация дейтерия в образцах сыворотки крови животных на 31-й день практически не отличалась от значений на 23-й день.

Потребление воды с повышенным содержанием дейтерия привело к стабильному возрастанию уровня дейтерия в тканях головного мозга крыс. Так, уже через 5 дней отмечено увеличение на 17%. Далее повышение содержания дейтерия составило 33, 42, 56, 74 и 91% соответственно для 8, 11, 16, 23 и 31-го дней по отношению к 0-му дню (контролю).

Необходимо отметить, что скорость изотопного $^2\text{H}/^1\text{H}$ обмена в крови и головном мозге была неравномерной в течение эксперимента (табл. 3). Она была выше в первые 5 сут, а затем скорость повышения концентрации дейтерия постепенно снижалась. Отрицательное значение для плазмы крови для периода с 24-го по 31-й дни отражает незначительное снижение ($p > 0,05$) уровня дейтерия, полученное для 31-го дня, по отношению к предыдущему, 23-му дню.

Таким образом, потребление крысами питьевого рациона с повышенным относительно природного уровня содержанием дейтерия приводит к увеличению его концентрации в крови и тканях головного мозга. При этом скорость изотопного $^2\text{H}/^1\text{H}$ обмена в крови и мозге экспериментальных животных максимальна в первые 8 дней применения обогащенной дейтерием воды. В дальнейшем происходит снижение данного параметра, что, вероятно, связано с насыщением макромолекул тканей крови и мозга атомами дейтерия.

Хемилюминесценция плазмы крови

Представленные на рис. 1 данные показывают, что при потреблении крысами воды с повышенным содер-

Таблица 2. Концентрация дейтерия в сыворотке крови и коре головного мозга экспериментальных животных при потреблении ими питьевого рациона с повышенным содержанием дейтерия ($\delta^2\text{H}/^1\text{H}=6704\text{‰}$) ($\delta^2\text{H}/^1\text{H}$, $M\pm m$, ‰)

Table 2. Deuterium level in blood serum and cerebral cortex of laboratory animals when they consumed a drinking ration with an increased deuterium content ($\delta^2\text{H}/^1\text{H}=6704\text{‰}$) ($\delta^2\text{H}/^1\text{H}$, $M\pm m$, ‰)

Образец Sample	День исследования / Day of the study						
	контроль (0 дней) control (0 days)	5	8	11	16	23	31
Сыворотка крови Blood serum	-25±4	2081±132*#	2997±60*#	3381±136*#	4068±141*#	4497±54*#	4425±103*
Кора головного мозга Cerebral cortex	-127±7	21±15*	162±17*#	241±11*#	365±32*#	519±23*#	667±32*#

Примечание. Статистически значимое отличие ($p<0,05$) по сравнению с показателем: * – контроля (0-й день); # – в предыдущий этап исследования.

Note. Statistically significant difference ($p<0.05$) compared to: * – control (day 0); # – the previous stage of the study.

Таблица 3. Скорость накопления дейтерия в сыворотке крови и коре головного мозга крыс в период потребления ими обогащенной дейтерием воды ($\delta^2\text{H}/^1\text{H}=6704\text{‰}$), ‰/сут

Table 3. Rate of deuterium accumulation in rat blood serum and brain tissue during the period of consumption of deuterium-enriched water, ‰/day

Образец Sample	День исследования / Day of the study					
	1-5	6-8	9-11	12-16	17-23	24-31
Сыворотка крови / Blood serum	421	305	128	137	61	-9
Кора головного мозга / Cerebral cortex	29,6	47,1	26,3	24,8	22,0	18,5

жанием дейтерия (6704‰) в плазме крови происходило смещение антиоксидантного/прооксидантного равновесия. Начиная с 8-го дня наблюдалась активация интенсивности ХЛ вплоть до 16-го дня, когда было отмечено максимальное повышение – 23% к контролю. Затем происходило снижение данного показателя и на 31-й день

потребления интенсивность ХЛ вернулась к физиологической норме и существенно не отличалась от контрольного значения.

Известно, что интенсивность ХЛ прямо пропорциональна скорости формирования свободных радикалов в исследуемой системе. Увеличение светосуммы ХЛ плазмы крови может быть следствием как уменьшения ее антиоксидантного потенциала, так и активацией свободнорадикальных процессов.

Полученные данные показывают, что потребление воды с повышенным содержанием дейтерия в начале эксперимента привело к нарушению баланса про- и антиоксидантных процессов. При более продолжительном воздействии произошло восстановление равновесия.

Прооксидантно-антиоксидантный баланс в головном мозге

На 5-е сутки эксперимента происходило резкое повышение светосуммы свечения на 23% к контролю (0-й день). К 8-м суткам этот показатель снижался до первоначального значения (рис. 2). Затем отмечено возрастание интенсивности ХЛ в тканях коры головного мозга на 16 и 24% соответственно на 11-е и 16-е сутки эксперимента ($p<0,05$). В дальнейшем на 23-и и 31-е сутки эксперимента наблюдалось снижение интенсивности ХЛ до уровня, не отличающегося от контроля.

Анализ результатов исследования активности каталазы (рис. 3) показал, что данный параметр возрастал на протяжении всего эксперимента. Статистически значимые отличия выявлены на 8, 11, 16, 23 и 31-й дни, когда активность каталазы увеличилась на 222, 244, 467, 511 и 533% соответственно.



Рис. 1. Влияние питьевого рациона с измененным изотопным составом ($\delta^2\text{H}/^1\text{H}=6704\text{‰}$) на интенсивность хемилюминесценции плазмы крови экспериментальных животных ($M\pm m$)

Здесь и на рис. 2, 3: статистически значимое отличие ($p<0,05$) по сравнению с показателем: * – контроля (0-й день); # – в предыдущий этап исследования.

Fig. 1. The effect of a drinking diet with altered isotopic composition ($\delta^2\text{H}/^1\text{H}=6704\text{‰}$) on the intensity of chemiluminescence of blood plasma in laboratory animals ($M\pm m$)

Here and on fig. 2, 3: statistically significant difference ($p<0.05$) compared to: * – control (day 0); # – the previous stage of the study.

Кроме того, на фоне повышения концентрации дейтерия в коре головного мозга крыс происходит усиление экспрессии генов (рис. 4), ответственных за синтез каталазы (*Cat*), глутаматцистеинлигазы (*Gclc*) – первого фермента клеточного пути биосинтеза GSH, редокс-чувствительного транскрипционного фактора *Nrf2* (*Nfe2l2*). Следует отметить некоторую закономерность в изменении активности генов данных белков. В 1-ю неделю потребления утяжеленной воды в коре головного мозга происходила активация генов всех 3 белков. На 2-й и 3-й неделе эксперимента наблюдалась пассивация экспрессии генов *Cat*, *Gclc*, *Nrf2* в данном отделе мозга. При дальнейшем повышении концентрации дейтерия в тканях головного мозга после 4 нед потребления изотопно-модифицированной воды происходило очередное повышение активности данных генов, за исключением гена *Gclc*.

Таким образом, поступление дейтерия в организм млекопитающих приводит к смещению редокс-состояния в тканях головного мозга. Параллельно наблюдается активация системы антиоксидантной защиты, которая проявляется в росте активности каталазы и усилении экспрессии ряда генов, кодирующих антиоксидантные белки.

Микробиом кишечника

Ежедневное повышение содержания дейтерия в организме крыс приводило к изменению количественного состава кишечного микробиома (табл. 4).

Наиболее выражено эти сдвиги затронули основных представителей кишечной микрофлоры, таких как *Bacteroides* и *Firmicutes*. Изменение численности *Firmicutes* и *Bacteroides* имело противоположные тенденции: при повышении численности бактерий типа *Firmicutes* наблюдалось снижение представителей *Bacteroides*. Наиболее ярко это проявлялось на 5-й и 8-й дни эксперимента, когда численность *Bacteroides* снизилась на 13 и 22% по сравнению с показателями, измеренными в 0-й день эксперимента. При этом популяция бактерий типа *Firmicutes*, наоборот, возрастала в эти сутки на 12 и 16% по сравнению с первоначальным значением.

Количественные изменения затронули популяции субдоминантных представителей кишечной микрофлоры. Повышение количества таких таксонов, как *Actinobacteria*, *Deferribacteria*, *Betaproteobacteria*, *Epsilonproteobacteria*, происходило по колоколообразной зависимости с течением всего времени эксперимента. Как видно из табл. 4, максимальная представленность в микробиоме данных групп микроорганизмов наблюдалась на 5–11-е сутки изотопного замещения против на дейтерий во внутренней среде организма. Доля семейства бактерий типа *Deferribacteria* достигла 2,4%, *Betaproteobacteria* – 2,6%, *Epsilonproteobacteria* – 1,8% по сравнению с начальным днем (0-й день) эксперимента (0,002, 0,04 и 0,31%). Небольшие количественные сдвиги в сторону повышения наблюдались в представленности бактерий типа *Actinobacteria*, к которым относятся *Bifidobacterium* и *Collinsella*. У *Saccaribacteria* на фоне

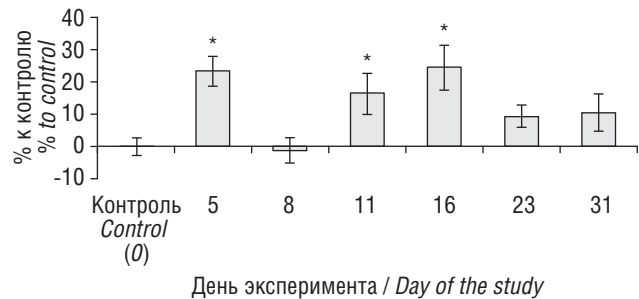


Рис. 2. Влияние питьевого рациона с измененным изотопным составом ($\delta^2\text{H}/^1\text{H}=6704\text{‰}$) на интенсивность хемилюминесценции супернатанта тканей головного мозга экспериментальных животных ($M\pm m$)

Fig. 2. The effect of a drinking diet with altered isotopic composition ($\delta^2\text{H}/^1\text{H}=6704\text{‰}$) on the chemiluminescence intensity of the brain tissue supernatant of experimental animals ($M\pm m$)

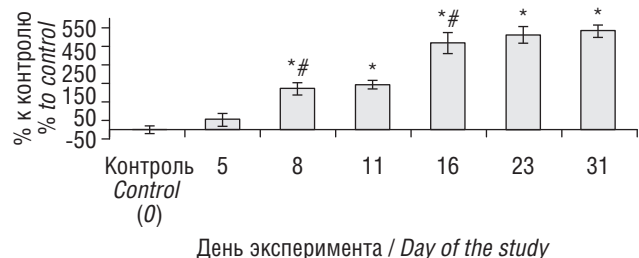


Рис. 3. Изменение активности каталазы в тканях головного мозга крыс на фоне потребления ими питьевого рациона с измененным изотопным составом ($\delta^2\text{H}/^1\text{H}=6704\text{‰}$) ($M\pm m$)

Fig. 3. Changes in catalase activity in rat brain tissues during their consumption of water with an altered isotopic composition ($\delta^2\text{H}/^1\text{H}=6704\text{‰}$) ($M\pm m$)

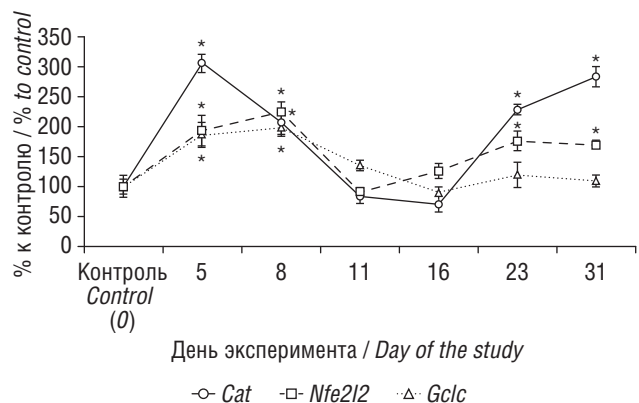


Рис. 4. Динамика изменения экспрессии генов в тканях головного мозга экспериментальных животных на фоне потребления ими питьевого рациона с измененным изотопным составом ($\delta^2\text{H}/^1\text{H}=6704\text{‰}$) ($M\pm m$)

* – статистически значимое отличие ($p<0,05$) по сравнению с контролем (0-й день).

Fig. 4. Dynamics of changes in gene expression in brain tissues of laboratory animals against the background of their consumption of a drinking ration with an altered isotopic composition ($\delta^2\text{H}/^1\text{H}=6704\text{‰}$) ($M\pm m$)

* – $p<0.05$ compared to control (day 0).

Таблица 4. Изменение микробиома кишечника экспериментальных животных на фоне потребления ими питьевого рациона с измененным изотопным составом ($\delta^2\text{H}/\text{H}=6704\text{‰}$)
Table 4. Changes in the intestinal microbiome of laboratory animals during their consumption of a drinking diet with an altered isotopic composition ($\delta^2\text{H}/\text{H}=6704\text{‰}$)

Представитель микробиома Representative of the microbiome	Состав микробиома, $M \pm m$, % / Microbiome composition, $M \pm m$, %						
	день исследования / day of the study						
	контроль (0 сут) / control (day 0)	5	8	11	16	23	31
<i>Bacteroidetes</i>	91,80±1,04	77,80±5,52*	70,04±5,49*	82,64±10,52	83,95±9,43	91,98±1,87	90,3±3,5
<i>Firmicutes</i>	7,17±0,93	19,72±4,73*	23,32±5,26*	13,51±7,78	14,22±8,81	6,78±1,45	8,4±3,14
<i>Saccaribacteria</i>	0,35±0,06	0,55±0,06*	0,23±0,04#	0,12±0,05*	0,45±0,24	0,33±0,12	0,45±0,10
<i>Epsilonproteobacteria</i>	0,31±0,15	0,55±0,29	0,99±0,24*	1,85±0,54*	0,39±0,10#	0,15±0,09	0,44±0,01#
<i>Actinobacteria</i>	0,17±0,02	0,16±0,01	0,44±0,08#	0,30±0,05*	0,29±0,08*	0,19±0,02	0,22±0,04
<i>Gammaaproteobacteria</i>	0,10±0,10	0,18±0,17	0,32±0,32	0,29±0,29	0,35±0,35	0,44±0,44	0,18±0,18
<i>Betaproteobacteria</i>	0,04±0,01	0,97±0,10*	2,58±0,23*#	0,57±0,20*#	0,05±0,02#	0,01±0,01	0,03±0,01
<i>Tenericutes</i>	0,01632±0,00823	0,00733±0,00732	0,00053±0,00028	0,00005±0,00005	0,00063±0,00041	0,00330±0,00317	0,00339±0,00169
<i>Verrucomicrobia</i>	0,00480±0,00127	0,00026±0,00013**	0,00069±0,00036*	0,00779±0,00758	0,23092±0,18784*	0,00061±0,00033*	0,00684±0,00793
<i>Deferribacteria</i>	0,00211±0,00052	0,00122±0,00030	2,37712±0,66975*#	0,59567±0,59206#	0,08483±0,02692*	0,00044±0,00022*	0,00139±0,00073

Примечание. * – статистически значимое отличие ($p<0,01$) по сравнению с контролем; # – статистически значимое отличие ($p<0,05$) по сравнению с показателем в предыдущий этап исследования.

Note. * – $p<0,01$ compared to control (day 0); # – $p<0,05$ compared to the previous stage of the study.

повышения содержания дейтерия в организме хозяина происходили неоднозначные изменения роста популяции. К 5-м суткам эксперимента их количество увеличилось, с 8–11-х суток снизилось и в дальнейшем не отличалось от начального уровня.

В контрольной группе на протяжении всего эксперимента достоверных изменений численности исследованных представителей микробиома не наблюдалось.

Стресс-протекторный эффект

Как видно из табл. 5, максимальная интенсивность ХЛ наблюдалась у животных в группе «Стресс, -37‰». Возрастание по сравнению с показателями крыс группы «Контроль, -37‰» составило 29% для плазмы крови и 39% – для коры головного мозга. Рост интегральной интенсивности ХЛ плазмы крови свидетельствует о формировании окислительного стресса у животных в исследуемой группе. У крыс, которые потребляли обогащенный дейтерием питьевой рацион в течение 38 дней и подверглись иммобилизационному стрессу, наблюдалось существенно меньшее возрастание интенсивности ХЛ. Так, для плазмы крови возрастание составило 12%, а для коры головного мозга – 21%, что статистически значимо меньше, чем в группе «Стресс, -37‰».

Таким образом, стрессорное воздействие приводило к существенно менее интенсивной активации окислительных процессов в крови и тканях головного мозга у тех животных, которые в течение 38 дней потребляли питьевой рацион, обогащенный дейтерием.

Обсуждение

У экспериментальных животных, потреблявших питьевой рацион с повышенной концентрацией дейтерия, наблюдается его постепенное накопление в крови и тканях головного мозга. Это приводит к изотопному замещению (протий на дейтерий) в составе ключевых биомолекул – белков, липидов и нуклеиновых кислот [16]. Данный процесс осуществляется по механизму Гротгуса: протоны и дейтроны мигрируют по цепям водородных связей, переходя от одной молекулы к другой. Кроме того, интенсивному изотопному обмену способствуют водородные связи между биомолекулами и молекулами их гидратных оболочек [25].

Таким образом, благодаря активному изотопному обмену в биомолекулах происходит обогащение дейтерием внутренней жидкости и тканей организма [26].

Известно, что изменение внутренней среды организма вызывает реакцию стресс-реализующих систем. Если интенсивность стресса не превосходит потенциал стресс-лимитирующей системы организма, его действие сводится к включению компенсаторных механизмов и развитию адаптации к вызвавшему стресс фактору. Данный процесс обеспечивается активацией систем регуляции, а затем эффекторных органов, что способствует новому уровню функций в организме в изменившихся условиях среды. Все это касается и модифика-

Таблица 5. Интенсивность хемилюминесценции (усл. ед.) в образцах плазмы крови и супернатанта коры головного мозга стрессированных крыс, получавших разные питьевые рационы в течение 38 сут ($M \pm m$)

Table 5. Chemiluminescence intensity (C.U.) in blood plasma and cerebral cortex samples from stressed rats that received different drinking rations for 38 days ($M \pm m$)

Образец Sample	Группа животных / Animal group		
	«Контроль, -37‰» «Control, -37‰»	«Стресс, -37‰» «Stress, -37‰»	«Стресс, 6704‰» «Stress, 6704‰»
Плазма крови / Blood plasma	72±3,2	93±2,5*	81±4,5 [#]
Кора головного мозга / Cerebral cortex	99±6,8	138±1,8*	120±6,5 [#]

П р и м е ч а н и е. Статистически значимое отличие ($p < 0,05$) по сравнению с показателем животных группы: * – контроль; [#] – «Стресс, -37‰».

N o t e. Statistically significant difference ($p < 0.05$) compared to: * – control; [#] – «Stress, -37‰».

ции изотопного состава внутренней среды организма [1]. В проведенном исследовании мы установили, что повышение уровня дейтерия в жидкостях и тканях организма млекопитающих приводит к развитию умеренной стрессовой реакции и адаптационного синдрома.

Согласно данным литературы, митохондрии рассматриваются в качестве одной из потенциальных мишеней воздействия как низких, так и высоких концентраций дейтерия на клеточном уровне. Предполагается, что в результате изотопного обмена дейтерий/протий увеличивается вероятность нахождения дейтерия в протонных каналах первого и третьего комплекса, а также в АТФ-синтазе пятого комплекса электрон-транспортной цепи [25]. Как известно, перенос протона в протонных помпах и транслоказе электрон-транспортной цепи осуществляется по цепочке водородных связей между аминокислотными остатками. Попадание дейтерия в один из указанных белков-переносчиков приводит к повышению прочности водородной связи и изменению их проводимости. Все эти процессы способны существенным образом изменять функциональные параметры митохондрий и клетки в целом. Так, ранее нами было показано, что снижение концентрации дейтерия приводит к падению мембранного потенциала митохондрий и внутриклеточного уровня Ca^{2+} – одного из важнейших клеточных регуляторов [27]. Мы предполагаем, что в развитии стрессовой реакции в клетках головного мозга, связанной с повышением содержания дейтерия, могут быть задействованы указанные выше процессы. Как известно, изменение мембранного потенциала митохондрий и увеличение концентрации цитоплазматического кальция способствуют продукции активных форм кислорода в митохондриях [21]. В наших экспериментах при повышении содержания дейтерия наблюдалась активация продукции свободных радикалов в тканях головного мозга. Наибольшее нарушение редокс-баланса наблюдалось в начальной фазе эксперимента, что коррелирует с пиковой скоростью изотопного обмена в системном кровотоке и церебральных тканях. При более продолжительном воздействии интенсивность продукции активных форм кислорода и азота уменьшается, что выражается уменьшением светосуммы ХЛ.

Из результатов наших исследований видно, что на начальных этапах воздействия происходит разбалансировка в работе антиоксидантной системы. Активность каталазы увеличивается и сохраняется высокой до конца эксперимента, что является результатом компенсаторной реакции на смещение редокс-равновесия. В ходе эксперимента было отмечено, что изменение экспрессии генов, ответственных за синтез каталазы и Nrf2, имеет U-образную зависимость. В первую и последнюю неделю эксперимента происходит активация экспрессии данных белков, тогда как в течение 2-й и 3-й недели наблюдается снижение активности. Активность гена *Gclc*, кодирующего гамма-глутамилцистеинсинтазу, наблюдается только в течение 1-й недели. Динамика экспрессии генов вышеперечисленных белков коррелирует с динамикой продукции свободных радикалов и является ее следствием. Возможно, наблюдаемая нами картина экспрессии генов – это результат развития адаптации. Фактор транскрипции Nrf2 активирует гены антиоксидантных белков, необходимых для восстановления окислительно-восстановительного баланса [28]. Гамма-глутамилцистеинсинтаза вместе с глутатионсинтазой обеспечивают синтез восстановленного глутатиона. Экспрессия гена *Gclc* усиливается в ответ на действие стрессовых факторов, приводящих к усилению продукции активных форм кислорода и азота. Повышенная экспрессия *Gclc* в начальной фазе эксперимента также является одним из звеньев развития адаптационного синдрома на фоне изменения содержания дейтерия. Таким образом, наблюдается картина развития адаптационного синдрома в результате изменения дейтериевого гомеостаза.

Существуют клинические и экспериментальные доказательства того, что между кишечником и мозгом существует двунаправленная связь. Микробиота кишечника влияет на развитие мозга, выработку нейромедиаторов, метаболитов и гормонов в кровь и лимфатическую систему через нейрональные, эндокринные и иммунные пути [29].

На фоне повышения содержания дейтерия в крови и тканях экспериментальных животных происходит изменение соотношения численности бактерий, населяющих кишечник. Данные литературы позволяют пред-

положить, что изменение метаболического состояния в тканях головного мозга, являющееся следствием компенсаторной реакции на повышение уровня дейтерия, индуцирует изменения количественного состава микробиома [30, 31]. Из полученных результатов видно, что соотношение населенности *Firmicutes/Bacteroides*, а также изменение численности *Actinobacteria*, *Deferibacteria*, *Betaproteobacteria*, *Epsilonproteobacteria* имеет колоколообразную зависимость и коррелирует с изменением антиоксидантного/прооксидантного равновесия в тканях головного мозга. Согласно концепции «ось мозг–кишечник», нарушение дейтериевого гомеостаза запускает компенсаторные реакции в головном мозге, что ведет к изменению его биохимии и метаболизма. Эти изменения, в свою очередь, вызывают перестройку количественного состава кишечной микробиоты у экспериментальных животных.

Активные формы кислорода действуют как критические сигнальные молекулы для запуска воспалительных реакций в центральной нервной системе, они приводят к активации и секреции провоспалительных цитокинов [28]. Цитокины оказывают влияние на кишечник через энтеральную нервную систему, воздействуя напрямую на афферентные нервные окончания либо через общий кровоток. В результате такого воздействия происходит нарушение перистальтики и проницаемости кишечного барьера, что ведет к размножению условно патогенных бактерий филума *Proteobacteria*. Известно, что различные метаболические нарушения в организме приводят к интенсификации размножения данных представителей кишечной микрофлоры и кишечному воспалению. Также на начальных этапах потребления животными утяжеленной воды происходит повышение численности *Firmicutes* и снижение *Bacteroides*. Возрастание численности *Firmicutes* в кишечнике также характерно во время нарушения метаболических процессов в организме [32]. Следует отметить, что на более поздних сроках эксперимента наблюдается восстановление кишечной микробиоты на фоне снижения продукции свободных радикалов и цитокинов, что может являться свидетельством завершения периода адаптации.

Согласно теории воздействия кишечник–мозг, колебания состава микробиома кишечника могут привести к метаболическим изменениям в головном мозге. Из данных литературы известно, что рост бактерий зависит от изотопного соотношения дейтерий/протий в среде [1]. При этом различные бактерии могут по-разному реагировать на этот фактор. Можно предположить,

что по мере изменения концентрации дейтерия в организме экспериментальных животных могла меняться активность и, соответственно, численность тех или иных представителей кишечной микрофлоры. На начальных этапах воздействия утяжеленной водой, при минимальном изменении концентрации дейтерия в организме могли активизироваться условно патогенные представители *Proteobacteria* и *Firmicutes*, что ранее отмечалось при стрессовом воздействии [33]. Более высокие концентрации дейтерия могли привести к подавлению роста этих бактерий. Прогрессирование условно патогенных микроорганизмов в кишечнике на начальных этапах эксперимента, вероятнее всего, способствовало высвобождению токсичных метаболитов, которые через блуждающий нерв или через общий кровоток оказывали влияние на ткани головного мозга, усиливая действие дейтериевого стресса.

Заключение

Результаты исследования демонстрируют, что употребление крысами питьевого рациона с повышенной концентрацией дейтерия приводит к накоплению этого изотопа в плазме крови и коре головного мозга. Наиболее интенсивно изотопный обмен (дейтерий/протий) протекал в первые 8 дней эксперимента. На начальном этапе эксперимента было зафиксировано нарушение баланса между про- и антиоксидантными системами, однако при продолжении воздействия этот показатель возвращался к исходным значениям. Параллельно с ростом концентрации дейтерия в биологических средах изменялся и состав кишечной микробиоты, который также демонстрировал тенденцию к нормализации со временем. При этом потребление крысами обогащенной дейтерием воды приводило к существенно меньшему нарастанию окислительных процессов в крови и мозге при воздействии иммобилизационного стресса. Выявленный стресс-протекторный эффект объясняется механизмом перекрестной адаптации. Активация антиоксидантной системы в ответ на дейтериевый стресс предотвратила усиление окисления у крыс при последующей иммобилизации.

Таким образом, рост концентрации дейтерия запускает стресс-реакцию и компенсаторные механизмы адаптации. Это приводит к активации антиоксидантной защиты, что повышает устойчивость организма к иммобилизационному стрессу.

Сведения об авторах

Козин Станислав Владимирович (Stanislav V. Kozin) – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории проблем распределения стабильных изотопов в живых системах ЮНЦ РАН (Ростов-на-Дону, Российская Федерация), доцент кафедры физики и информационных систем ФГБОУ ВО «КубГУ» (Краснодар, Российская Федерация)

E-mail: kozinsv85@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9881-259X>

Сигарева Александра Сергеевна (Alexandra S. Sigareva) – лаборант кафедры технологии жиров, косметики, товароведения, процессов и аппаратов ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (Краснодар, Российская Федерация)

E-mail: uklys@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0000-8445-8139>

Моисеев Аркадий Викторович (Arkady V. Moiseev) – доктор экономических наук, доцент, начальник отдела организации и сопровождения научной деятельности ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ (Краснодар, Российская Федерация)

E-mail: moiseew_a@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7605-6826>

Козлова Елена Алексеевна (Elena A. Kozlova) – бакалавр кафедры физики и информационных систем ФГБОУ ВО «КубГУ» (Краснодар, Российская Федерация)

E-mail: elena141204@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-5874-5901>

Рубайло Александра Денисовна (Alexandra D. Rubailo) – бакалавр кафедры физики и информационных систем ФГБОУ ВО «КубГУ» (Краснодар, Российская Федерация)

E-mail: rubailo.alexandra@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-8159-1523>

Кравцов Александр Анатольевич (Aleksandr A. Kravtsov) – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории проблем распределения стабильных изотопов в живых системах ЮНЦ РАН (Ростов-на-Дону, Российская Федерация), лаборант отдела биологически-активных веществ ФГБОУ ВО «КубГУ» (Краснодар, Российская Федерация), старший научный сотрудник экспериментальной клиники-лаборатории биологически активных веществ животного происхождения ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» (Москва, Российская Федерация)

E-mail: aakravtsov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2462-577X>

Литература

- Basov A., Fedulova L., Baryshev M., Dzhimak S. Deuterium-depleted water influence on the isotope $^2\text{H}/^1\text{H}$ regulation in body and individual adaptation // *Nutrients*. 2019. Vol. 11. P. 1903. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu11081903>
- De Wit J.C., van der Straaten C.M., Mook W.G. Determination of the absolute hydrogen isotopic ratio of VSMOW and SLAP // *Geo-standards Newslett.* 1980. Vol. 4, N 1. P. 33–36. DOI: <https://doi.org/10.1111/J.1751-908X.1980.TB00270.X>
- Быков М.И., Джимаков С.С., Басов А.А., Арцыбашева О.М., Шашков Д.И., Барышев М.Г. Сравнительная характеристика изотопного D/H состава и антиоксидантной активности свежевыжатых соков из овощей и фруктов, выращенных в различных географических регионах // *Вопросы питания*. 2015. Т. 84, № 4. С. 89–96. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2015-00038>
- Villanueva G.L., Mumma M.J., Novak R.E., Käufel H.U., Hartogh P., Encrenaz T. et al. Strong water isotopic anomalies in the martian atmosphere: probing current and ancient reservoirs // *Science*. 2015. Vol. 348, N 6231. P. 218–221. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aaa3630>
- Répás Z., Györi Z., Buzás-Bereczki O., Boros L.G. The biological effects of deuterium present in food // *Discover Food*. 2025. Vol. 5, N 1. P. 57. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00327-4>
- Козин С.В., Кравцов А.А., Елкина А.А., Злищева Э.И., Барышева Е.В., Шурыгина Л.В. и др. Изотопное замещение дейтерия на протий в тканях головного мозга крыс изменяет его резистентность к гипоксии // *Биофизика*. 2019. Т. 64, № 2. С. 362–370. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0006302919020169>
- Korchinsky N., Davis A.M., Boros L.G. Nutritional deuterium depletion and health: a scoping review // *Metabolomics*. 2024. Vol. 20, N 6. P. 117. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11306-024-02173-4>
- Kravtsov A., Kozin S., Basov A., Butina E., Baryshev M., Malysheko V. et al. Reduction of deuterium level supports resistance of neurons to glucose deprivation and hypoxia: study in cultures of neurons and on animals // *Molecules*. 2022. Vol. 27. P. 243. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27010243>
- Lu Y., Chen H. Deuterium-depleted water in cancer therapy: a systematic review of clinical and experimental trials // *Nutrients*. 2024. Vol. 16, N 9. P. 1397. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu16091397>
- Seneff S., Kyriakopoulos A.M. Taurine prevents mitochondrial dysfunction and protects mitochondria from reactive oxygen species and deuterium toxicity // *Amino Acids*. 2025. Vol. 57, N 1. P. 6. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00726-024-03440-3>
- Яглова Н.В., Обернихин С.С., Тимохина Е.П., Яглов В.В., Назимова С.В. Изменения секреторных процессов в щитовидной железе и гипофизе при постепенном уменьшении содержания дейтерия в организме // *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины*. 2022. Т. 174, № 12. С. 776–779. DOI: <https://doi.org/10.47056/0365-9615-2022-174-12-776-779>
- Басов А.А., Быков И.М., Барышев М.Г., Джимаков С.С., Быков М.И. Концентрация дейтерия в пищевых продуктах и влияние воды с модифицированным изотопным составом на показатели свободнорадикального окисления и содержание тяжелых изотопов водорода у экспериментальных животных // *Вопросы питания*. 2014. Т. 83, № 5. С. 43–50. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2014-00048> PMID: 25816625.
- Барышев М.Г., Басов А.А., Болотин С.Н., Джимаков С.С., Кашаев Д.В., Федосов С.Р. и др. Оценка антирадикальной активности воды с модифицированным изотопным составом с помощью ЯМР-, ЭПР- и масс-спектропии // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2012. Т. 76, № 12. С. 1507–1510. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873812120039>
- Козин С.В., Лясота О.М., Кравцов А.А., Чихиржина Е.В., Ивлев В.А., Попов К.А. и др. Смещение прооксидантно-антиоксидантного равновесия в организме лабораторных животных при пятикратном повышении концентрации дейтерия в питьевом рационе // *Биофизика*. 2023. Т. 68, № 2. С. 369–375. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0006302923020163>
- Джимаков С.С., Барышев М.Г., Басов А.А., Тимаков А.А. Влияние воды со сниженным содержанием дейтерия на изотопный состав лиофилизированных тканей и морфофункциональные показатели организма у крыс из разных поколений // *Биофизика*. 2014. Т. 59, № 4. С. 749–756. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0006350914040101>
- Basov A., Fedulova L., Vasilevskaya E., Dzhimak S. Possible mechanisms of biological effects observed in living systems during $^2\text{H}/^1\text{H}$ isotope fractionation and deuterium interactions with other biogenic isotopes // *Molecules*. 2019. Vol. 24. P. 4101. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24224101>
- Джимаков С.С., Басов А.А., Федуллова Л.В., Дыдыкин А.С., Быков И.М., Лясота О.М. и др. Коррекция метаболических процессов у крыс при хроническом эндотоксикозе с помощью реакций изотопного (D/H) обмена // *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*. 2015. № 5. С. 518–527. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002332915050069>
- Kozin S., Skrebitsky V., Kondratenko R., Kravtsov A., Butina E., Moiseev A. et al. Electrophysiological activity and survival rate of rats nervous tissue cells depends on D/H isotopic composition of medium // *Molecules*. 2021. Vol. 26. P. 2036. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26072036>
- Zlatskiy I., Pleteneva T., Skripnikov A., Grebennikova T., Maksimova T., Antipova N. et al. Dependence of biocatalysis on D/H ratio:

- possible fundamental differences for high-level biological taxons // *Molecules*. 2020. Vol. 25. P. 4173. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25184173>
20. Svidlov A.A., Drobotenko M.I., Basov A.A., Elkina A.A., Gerasimenko E.O., Malysheko V.V. et al. Influence of the $2\text{H}/1\text{H}$ isotope composition of the water environment on the probability of denaturation bubble formation in a DNA molecule // *Phys. Wave Phenom.* 2021. Vol. 29, N 2. P. 180–185. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1541308X2102014X>
21. Basov A.A., Elkina A.A., Samkov A.A., Volchenko N.N., Moiseev A.V., Fedulova L.V. et al. Influence of deuterium-depleted water on the isotope D/H composition of liver tissue and morphological development of rats at different periods of ontogenesis // *Iran. Biomed. J.* 2019. Vol. 23, N 2. P. 129–141. DOI: <https://doi.org/10.29252/23.2.129>
22. Козин С.В., Кравцов А.А., Туроверов К.К., Фонин А.В., Чихиржина Е.В., Малышко В.В. и др. Изменение функциональной активности пероксидазы хрена и бычьего сывороточного альбумина в средах с различным изотопным $^2\text{H}/^1\text{H}$ -составом // *Биофизика*. 2020. Т. 65, № 2. С. 229–236. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0006302920020039>
23. Джимак С.С., Копытов Г.Ф., Кашаев Д.В., Соколов М.Е., Арцыбашева О.М., Шарапов К.С. и др. Применение ЯМР-спектроскопии для определения низких концентраций нерадиоактивных изотопов в жидких средах // *Известия вузов. Физика*. 2015. Т. 58, № 7. С. 47–52. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11182-015-0591-9>
24. Королюк М.А., Иванова Л.И., Майорова И.Г., Токарев В.Е. Метод определения активности каталазы // *Лабораторное дело*. 1988. № 1. С. 16–19.
25. Boros L.G., Seneff S., Túri M., Palcsu L., Zubarev R.A. Active involvement of compartmental, inter- and intramolecular deuterium disequilibrium in adaptive biology // *Proc. Natl Acad. Sci. USA*. 2024. Vol. 121, N 37. Article ID e2412390121. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2412390121>
26. Yaglova N.V., Timokhina E.P., Obernikhin S.S., Yaglov V.V. Emerging role of deuterium/protium disbalance in cell cycle and apoptosis // *Int. J. Mol. Sci.* 2023. Vol. 24. P. 3107. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms24043107>
27. Кравцов А.А., Лясота О.М., Козлова Е.А., Моисеев А.В., Козин С.В. Влияние концентрации дейтерия среды на кальциевый гомеостаз, мембранный потенциал митохондрий и гибель нейронов при глюкозной депривации // *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины*. 2025. Т. 179, № 1. С. 37–42. DOI: <https://doi.org/10.47056/0365-9615-2025-179-1-37-42>
28. Gureev A.P., Chernyshova E.V., Krutskikh E.P., Sadovnikova I.S., Tekutsкая E.E., Dorohova A.A. Role of the Nrf2/ARE pathway in the mtDNA repair // *Front. Biosci. (Landmark Ed.)*. 2024. Vol. 29, N 6. P. 218. DOI: <https://doi.org/10.31083/j.fbi2906218>
29. Zhuang M., Zhang X., Cai J. Microbiota-gut-brain axis: interplay between microbiota, barrier function and lymphatic system // *Gut Microbes*. 2024. Vol. 16, N 1. Article ID 2387800. DOI: <https://doi.org/10.1080/19490976.2024.2387800>
30. Osadchiy V., Martin C.R., Mayer E.A. The gut-brain axis and the microbiome: mechanisms and clinical implications // *Clin. Gastroenterol. Hepatol.* 2019. Vol. 17, N 2. P. 322–332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cgh.2018.10.002>
31. Mayer E.A., Tillisch K., Gupta A. Gut/brain axis and the microbiota // *J. Clin. Invest.* 2015. Vol. 125, N 3. P. 926–938. DOI: <https://doi.org/10.1172/JCI76304>
32. Chang C.J., Lin C.S., Lu C.C., Martel J., Ko Y.F., Ojcius D.M. et al. *Ganoderma lucidum* reduces obesity in mice by modulating the composition of the gut microbiota // *Nat. Commun.* 2015. Vol. 6. P. 7489. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms8489>
33. Комиссарова Д.В., Каширина Д.Н., Пастушкова Л.Х., Гончарова А.Г., Усанова Н.А., Орлов О.И. и др. Условно-патогенная микрофлора кишечника человека и протеом крови хозяина — поиск взаимосвязей // *Технологии живых систем*. 2024. Т. 21. № 1. С. 5–19. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700997-202401-01>

References

1. Basov A., Fedulova L., Baryshev M., Dzhimak S. Deuterium-depleted water influence on the isotope $^2\text{H}/^1\text{H}$ regulation in body and individual adaptation. *Nutrients*. 2019; 11: 1903. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu11081903>
2. De Wit J.C., van der Straaten C.M., Mook W.G. Determination of the absolute hydrogen isotopic ratio of VSMOW and SLAP. *Geostandards Newsl.* 1980; 4 (1): 33–6. DOI: <https://doi.org/10.1111/J.1751-908X.1980.TB00270.X>
3. Bykov M.I., Dzhimak S.S., Basov A.A., Artsybasheva O.M., Shashkov D.I., Baryshev M.G. Comparative characteristics of the isotopic D/H composition and antioxidant activity of freshly squeezed juices from fruits and vegetables grown in different geographical regions. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2015; 84 (4): 89–96. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2015-00038> (in Russian)
4. Villanueva G.L., Mumma M.J., Novak R.E., Käufel H.U., Hartogh P., Encrenaz T., et al. Strong water isotopic anomalies in the martian atmosphere: probing current and ancient reservoirs. *Science*. 2015; 348 (6231): 218–21. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aaa3630>
5. Répás Z., Györi Z., Buzás-Bereczki O., Boros L.G. The biological effects of deuterium present in food. *Discover Food*. 2025; 5 (1): 57. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00327-4>
6. Kozin S.V., Kravtsov A.A., Elkina A.A., Zlischcheva E.I., Barysheva E.V., Shurygina L.V., et al. Isotope exchange of deuterium for protium in rat brain tissues changes brain tolerance to hypoxia. *Biophysics*. 2019; 64 (2): 272–8. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0006350919020106>
7. Korchinsky N., Davis A.M., Boros L.G. Nutritional deuterium depletion and health: a scoping review. *Metabolomics*. 2024; 20 (6): 117. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11306-024-02173-4>
8. Kravtsov A., Kozin S., Basov A., Butina E., Baryshev M., Malysheko V., et al. Reduction of deuterium level supports resistance of neurons to glucose deprivation and hypoxia: study in cultures of neurons and on animals. *Molecules*. 2022; 27: 243. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27010243>
9. Lu Y., Chen H. Deuterium-depleted water in cancer therapy: a systematic review of clinical and experimental trials. *Nutrients*. 2024; 16 (9): 1397. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu16091397>
10. Seneff S., Kyriakopoulos A.M. Taurine prevents mitochondrial dysfunction and protects mitochondria from reactive oxygen species and deuterium toxicity. *Amino Acids*. 2025; 57 (1): 6. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00726-024-03440-3>
11. Yaglova N.V., Obernikhin S.S., Timokhina E.P., Yaglov V.V., Nazimova S.V. Changes in secretion of the thyroid and pituitary glands with a gradual decrease in deuterium body content. *Bull Exp Biol Med*. 2023; 174 (6): 797–800. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10517-023-05792-4>
12. Basov A.A., Bykov I.M., Baryshev M.G., Dzhimak S.S., Bykov M.I. Determination of deuterium concentration in foods and influence of water with modified isotopic composition on oxidation parameters and heavy hydrogen isotopes content in experimental animals. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2014; 83 (5): 43–50. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2014-00048> PMID: 25816625. (in Russian)
13. Baryshev M.G., Basov A.A., Bolotin S.N., Dzhimak S.S., Kashaev D.V., Fedosov S.R., et al. NMR, EPR, and mass spectroscopy estimates of the antiradical activity of water with modified isotope composition. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2012; 76 (12): 1349–1352. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873812120039>
14. Kozin S.V., Lyasota O.M., Kravtsov A.A., Chikhirzhina E.V., Ivlev V.A., Popov K.A., et al. Shift of Prooxidant–Antioxidant Balance in Laboratory Animals at Five Times Higher Deuterium Content in Drinking Water. *Biophysics*. 2023; 68 (2): 289–294. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0006350923020112>
15. Dzhimak S.S., Baryshev M.G., Basov A.A., Timakov A.A. Influence of deuterium depleted water on freeze dried tissue isotopic composition and morphofunctional body performance in rats of different generations. *Biophysics*. 2014; 59 (4): 614–9. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0006350914040101>
16. Basov A., Fedulova L., Vasilevskaya E., Dzhimak S. Possible mechanisms of biological effects observed in living systems during $^2\text{H}/^1\text{H}$ isotope fractionation and deuterium interactions with other biogenic isotopes. *Molecules*. 2019; 24: 4101. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24224101>
17. Dzhimak S.S., Basov A.A., Fedulova L.V., Didikin A.S., Bikov I.M., Artsybasheva O.M., et al. Correction of metabolic processes in rats during chronic endotoxemia using isotope (D/H) exchange reactions. *Biology Bulletin*. 2015; 42 (5): 440–8. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062359015050064>
18. Kozin S., Skrebitsky V., Kondratenko R., Kravtsov A., Butina E., Moiseev A., et al. Electrophysiological activity and survival rate of rats nervous tissue cells depends on D/H isotopic composition of medium. *Molecules*. 2021; 26: 2036. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26072036>
19. Zlatitskiy I., Pleteneva T., Skripnikov A., Grebennikova T., Maksimova T., Antipova N., et al. Dependence of biocatalysis on D/H ratio: possible fundamental differences for high-level biological taxons. *Molecules*. 2020; 25: 4173. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25184173>

20. Svidlov A.A., Drobotenko M.I., Basov A.A., Elkina A.A., Gerasimenko E.O., Malyshko V.V., et al. Influence of the $2\text{H}/1\text{H}$ isotope composition of the water environment on the probability of denaturation bubble formation in a DNA molecule. *Phys Wave Phenom*. 2021; 29 (2): 180–5. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1541308X2102014X>
21. Basov A.A., Elkina A.A., Samkov A.A., Volchenko N.N., Moiseev A.V., Fedulova L.V., et al. Influence of deuterium-depleted water on the isotope D/H composition of liver tissue and morphological development of rats at different periods of ontogenesis. *Iran Biomed J*. 2019; 23 (2): 129–41. DOI: <https://doi.org/10.29252/23.2.129>
22. Kozin S.V., Kravtsov A.A., Turoverov K.K., Fonin A.V., Chikhirzhina E.V., Moiseev A.V., et al. Changes in the functional activity of horseradish peroxidase and bovine serum albumin in media with different isotope $^2\text{H}/^1\text{H}$ compositions. *Biophysics*. 2020; 65(2): 195–201. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0006350920020098>
23. Dzhimak S.S., Basov A.A., Kopytov G.F., Kashaev D.V., Sokolov M.E., Artsybasheva O.M., et al. Application of NMR spectroscopy to the determination of low concentrations of nonradioactive isotopes in liquid media. *Russian Physics Journal*. 2015; 58 (7): 923–9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11182-015-0591-9>
24. Korolyuk M.A., Ivanova L.I., Mayorova I.G., Tokarev V.E. Method for determining catalase activity. *Laboratornoe delo [Laboratory Work]*. 1988; (1): 16–9. (in Russian)
25. Boros L.G., Seneff S., Túri M., Palcsu L., Zubarev R.A. Active involvement of compartmental, inter- and intramolecular deuterium disequilibrium in adaptive biology. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2024; 121 (37): e2412390121. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2412390121>
26. Yaglova N.V., Timokhina E.P., Obernikhin S.S., Yaglov V.V. Emerging role of deuterium/protium disbalance in cell cycle and apoptosis. *Int J Mol Sci*. 2023; 24: 3107. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms24043107>
27. Kravtsov A.A., Lyasota O.M., Kozlova E.A., Moiseev A.V., Kozin S.V. Effect of deuterium concentration in the incubation medium on intracellular Ca^{2+} level, mitochondrial membrane potential, and neuronal death during glucose deprivation. *Bull Exp Biol Med*. 2025; 179: 29–33. DOI: <https://doi.org/10.47056/0365-9615-2025-179-1-37-42>
28. Gureev A.P., Chernyshova E.V., Krutskikh E.P., Sadovnikova I.S., Tekutskaya E.E., Dorohova A.A. Role of the Nrf2/ARE pathway in the mtDNA repair. *Front Biosci (Landmark Ed)*. 2024; 29 (6): 218. DOI: <https://doi.org/10.31083/j.fbl2906218>
29. Zhuang M., Zhang X., Cai J. Microbiota-gut-brain axis: interplay between microbiota, barrier function and lymphatic system. *Gut Microbes*. 2024; 16 (1): 2387800. DOI: <https://doi.org/10.1080/19490976.2024.2387800>
30. Osadchiy V., Martin C.R., Mayer E.A. The gut-brain axis and the microbiome: mechanisms and clinical implications. *Clin Gastroenterol Hepatol*. 2019; 17 (2): 322–32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cgh.2018.10.002>
31. Mayer E.A., Tillisch K., Gupta A. Gut/brain axis and the microbiota. *J Clin Invest*. 2015; 125 (3): 926–38. DOI: <https://doi.org/10.1172/JCI176304>
32. Chang C.J., Lin C.S., Lu C.C., Martel J., Ko Y.F., Ojcius D.M., et al. *Ganoderma lucidum* reduces obesity in mice by modulating the composition of the gut microbiota. *Nat Commun*. 2015; 6: 7489. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms8489>
33. Komissarova D.V., Kashirina D.N., Pastushkova L.Kh., Goncharova A.G., Usanova N.A., Orlov O.I., et al. Conditionally pathogenic microflora of the human intestine and the host blood proteome – search for relationships. *Tekhnologii zhyvykh sistem [Living Systems Technologies]*. 2024; 21 (1): 5–19. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700997-202401-01> (in Russian)

Для корреспонденции

Иванова Галина Тажимовна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физиологии сердечно-сосудистой и лимфатической систем ИФ РАН
Адрес: 199034, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 6
Телефон: (812) 328-07-01
E-mail: ivanovagt@infran.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0188-5173>

Иванова Г.Т.

Влияние полифенолов на дилатацию сосудов крыс, получающих высокожировую рацион

Effect of polyphenols
on vascular dilation in rats
receiving a high-fat diet

Ivanova G.T.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии им. И.П. Павлова Российской академии наук, 199034, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, 199034, Saint Petersburg, Russian Federation

Потребление высокожирового рациона (ВЖР) приводит к развитию метаболического синдрома (МС), а прием полифенолов может оказывать протективное действие, снижая выраженность МС и предупреждая нарушения сердечно-сосудистой системы.

Целью исследования была проверка гипотезы о возможном протективном эффекте приема полифенолов (ресвератрола и кверцетина) на реактивность брыжеечных артерий крыс Wistar, получавших избыточное количество жиров с рационом.

Материал и методы. Исследование проведено на 4 группах крыс Wistar: животные группы ВЖР (n=15) получали ВЖР (50% жиров по калорийности), животным ВЖР+Р (n=10) и ВЖР+К (n=10) на фоне ВЖР внутрижелудочно вводили, соответственно, ресвератрол и кверцетин в дозе 50 мг/кг массы тела), крысы контрольной группы (СР, n=15) получали стандартный рацион. Через 8 нед исследовали реакции предконтрактированных фенилэфрином брыжеечных артерий на ацетилхолин (АХ) и нитропруссид натрия (НП), оцененные в процентах от амплитуды предсокращения на фенилэфрин, в отсутствие и при применении блокаторов NO-синтазы (L-NAME). Диаметр сосудов измеряли в программе ММС с помощью микрофото- и видеорегистрации в режиме *in vivo*.

Результаты. Прием полифенолов при ВЖР оказывает протективное действие на выраженность МС: предотвращает рост артериального давления, снижает дислипидемию и висцеральное ожирение. Оценка функционального состояния

Финансирование. Работа проведена в рамках выполнения государственного задания (№ 1021062411787-0-3.1.8).

Конфликт интересов. Автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Иванова Г.Т. Влияние полифенолов на дилатацию сосудов крыс, получающих высокожировую рацион // Вопросы питания. 2025. Т. 94, № 6. С. 28–36. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-28-36>

Статья поступила в редакцию 07.08.2025. **Принята в печать** 20.10.2025.

Funding. The research was supported by funds from the federal budget within the framework of the state assignment of the Pavlov Institute of Physiology of the Russian Academy of Sciences (No. 1021062411787-0-3.1.8).

Conflict of interest. The author reports no conflict of interest.

For citation: Ivanova G.T. Effect of polyphenols on vascular dilation in rats receiving a high-fat diet. Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]. 2025; 94 (6): 28–36. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-28-36> (in Russian)

Received 07.08.2025. **Accepted** 20.10.2025

брыжеечных артерий показала, что применение ресвератрола и кверцетина препятствовало снижению дилатации при действии АХ – общая реактивность сосудов при ступенчатом повышении концентрации АХ в диапазоне 10^{-10} – 10^{-5} М у крыс групп ВЖР+Р и ВЖР+К не отличалась от контроля, тогда как у животных группы ВЖР она была на 33,9% меньше, чем у животных, получавших стандартный рацион. При концентрации АХ 10^{-5} М амплитуда вазодилатации брыжеечных артерий у крыс группы ВЖР была снижена и составляла $85,0 \pm 5,2$ против $106,1 \pm 6,4\%$ в контроле ($p < 0,001$), а у крыс, получавших полифенолы ($103,9 \pm 8,6\%$ – ВЖР+Р; $99,8 \pm 6,3\%$ – ВЖР+К) – не отличалась от контроля. Блокада NO-синтазы снижала амплитуду дилатации у крыс группы ВЖР в среднем на 46,6%, тогда как в контроле – на 68,7%, у животных группы ВЖД+Р – на 68,4%, ВЖР+К – на 71,3%. Реактивность на НП не различалась между группами.

Заключение. Прием полифенолов (ресвератрола и кверцетина) при избыточном потреблении жиров снижает выраженность МС: уменьшает висцеральное ожирение, улучшает показатели углеводного и липидного обмена, препятствует подъему артериального давления. Получены данные, подтверждающие гипотезу о протективном действии полифенолов при ВЖР на функциональное состояние брыжеечных артерий крыс: прием ресвератрола или кверцетина предупреждает развитие характерной для ВЖР эндотелиальной дисфункции, сохраняя NO-зависимые механизмы вазодилатации.

Ключевые слова: высокожировой рацион; ресвератрол; кверцетин; брыжеечная артерия; эндотелий; ацетилхолин-индуцированная дилатация; крысы

Consumption of a high-fat diet (HFD) leads to the development of metabolic syndrome (MS), and the use of polyphenols can have a protective effect, reducing the severity of MS and preventing disorders of the cardiovascular system.

The aim of the study was to test the hypothesis of a possible protective effect of polyphenol (resveratrol and quercetin) usage on the reactivity of the mesenteric arteries in Wistar rats fed an excessive amount of fat in the diet.

Material and methods. The study included 4 groups of Wistar rats: the HFD group ($n=15$) received HFD (50% fat by calories), groups HFD+R ($n=10$) and HFD+Q ($n=10$) were fed HFD, and resveratrol and quercetin were administered intragastrically at a dose of 50 mg/kg body weight, respectively; rats of the control group (SD, $n=15$) received a standard diet. After 8 weeks, the reactions of the mesenteric arteries pre-configured with phenylephrine to acetylcholine (ACh) and sodium nitroprusside (NP), estimated as percentage of the contraction amplitude to phenylephrine, were studied in the absence and with the use of NO-synthase blockers (L-NAME). The diameter of the vessels was measured in the MMC program using in vivo microphotography and video recording.

Results. Administration of polyphenols under HFD had a protective effect on the severity of MS: it prevented an increase in blood pressure, reduced dyslipidemia and visceral obesity, which are characteristic of HFD. Evaluation of the functional state of the mesenteric arteries (in vivo) showed that the use of resveratrol and quercetin prevented inhibition of the dilation of the mesenteric arteries to ACh: total vascular reactivity with a stepwise increase in the concentration of ACh (in the range of 10^{-10} – 10^{-5} M) in HFD+R and HFD+Q rats did not differ from the control, whereas in the HFD group it was 33.9% less than in the SD group. At the ACh concentration of 10^{-5} M, the amplitude of mesenteric artery vasodilation in the HFD rats was reduced and amounted to 85.0 ± 5.2 vs $106.1 \pm 6.4\%$ in control rats ($p < 0.001$), and in the rats treated with polyphenols it did not differ from the control ($103.9 \pm 8.6\%$ for HFD+R, $99.8 \pm 6.3\%$ for HFD+Q). Blockade of NO-synthase reduced the amplitude of dilation in HFD rats by 46.6%, while in the control group – by 68.7%, in HFD+R group – by 68.4%, in HFD+Q group – by 71.3%. Reactivity to NP did not differ between the groups.

Conclusion. The consumption of polyphenols (resveratrol and quercetin) with excessive fat intake reduces the severity of MS: lowers visceral obesity, improves carbohydrate and lipid metabolism, prevents blood pressure rise. Data have been obtained confirming the hypothesis of the protective effect of polyphenols in HFD on the functional state of the mesenteric arteries of rats: resveratrol or quercetin intake prevents the development of endothelial dysfunction characteristic of HFD, preserving NO-dependent vasodilation mechanisms.

Keywords: high-fat diet; resveratrol; quercetin; mesenteric artery; endothelium; acetylcholine-induced dilation; rats

Метаболический синдром (МС) в настоящее время является широко распространенным заболеванием, во многом ассоциированным с несбалансированным питанием, в частности с увеличением потребления высококалорийной пищи. Избыточное потребление жиров и углеводов приводит к появлению основных факторов МС: росту уровня артериального давления (АД), общему и висцеральному ожирению, инсулинрезистентности и дислипидемии, а также к функциональным нарушениям сердечно-сосудистой системы [1]. Эпидемиологические исследования показали, что МС часто сопровождается развитием сахарного диабета, жировой болезни печени, артериальной гипертензии [2]. Обычно у пациентов с МС отмечается нарушение липидного обмена [повышение уровня триглицеридов и липопротеинов низкой плотности (ЛПНП), гиперхолестеринемия], увеличение массы висцерального жира, жировое поражение печени, усиление атерогенеза [3]. Кроме того, характерные для МС изменения углеводного обмена вследствие снижения чувствительности к инсулину приводят к нарушению утилизации глюкозы, что индуцирует гипергликемию и развитие сахарного диабета. Поиск способов предупреждения или коррекции признаков МС, а также снижение проявлений нарушений сердечно-сосудистой системы является одной из актуальных задач, при этом особый интерес представляют диетические методы, которые, в отличие от многих фармацевтических препаратов, имеют гораздо меньше побочных эффектов или противопоказаний. Так, при МС у крыс показан протективный эффект замены животного белка в рационе протеинами сои (Supro-760) на липидный и углеводный обмен, а также функциональное состояние сосудов [4]. Еще одним из таких методических подходов является возможность использования биологически активных соединений, содержащихся в обычных овощах и фруктах, например полифенолов [5]. В данном исследовании внимание было направлено на природные полифенолы ресвератрол и кверцетин. Ресвератрол (3,5,4'-тригидроксистерильбен) содержится, например, в виноградной кожце, орехах, семенах, а кверцетин (3,3',4',5,7-пентагидроксифлавонон) – во фруктах, зеленых листовых овощах, брокколи, семенах, в некоторых лекарственных травах. Поскольку содержание полифенолов в продуктах невелико, используют экстракты из растительного сырья, содержащего ресвератрол и кверцетин в достаточном количестве. Клинические и экспериментальные исследования показали эффективность ресвератрола и кверцетина при МС, отмечено снижение в крови уровня триглицеридов и глюкозы, повышение содержания липопротеинов высокой плотности (ЛПВП), ослабление инсулинрезистентности, потеря массы тела [6], а также продемонстрировано общее антиоксидантное и противовоспалительное действие [7]. Показано, что полифенолы могут оказывать протективное действие на сосуды, в частности у крыс со спонтанной гипертензией отмечено увеличение выработки NO и ремоделирование артериальных сосу-

дов при приеме ресвератрола [8, 9]. Показаны противовоспалительный, антиоксидантный, иммуномодулирующий, гипотензивный и гиполлипидемический эффекты приема ресвератрола [7, 10] и кверцетина [11, 12]. Имеются предложения об использовании полифенолов при лечении ожирения [13], сердечно-сосудистых заболеваний [14, 15] и сахарного диабета [16].

Учитывая разнообразные физиологические эффекты приема полифенолов, особый интерес представляет возможность их использования для улучшения состояния сосудов при метаболических заболеваниях, однако единого мнения об эффектах полифенолов при подобных состояниях нет [17, 18]. Механизмы влияния полифенолов на функциональное состояние сосудов различного типа при избыточном потреблении жиров изучены недостаточно.

В связи с этим **целью** работы было оценить влияние приема ресвератрола и кверцетина на выраженность основных факторов МС и ацетилхолин-индуцированную дилатацию брыжеечных артерий крыс, содержащихся на высокожировом рационе (ВЖР).

Материал и методы

В исследовании были использованы 50 самцов крыс стока Wistar (Центр коллективного пользования «Биоколлекция» Института физиологии им. И.П. Павлова РАН) с исходной массой тела 220–240 г. Все манипуляции с животными проводили в соответствии с принципами Базельской декларации о использовании животных в научных исследованиях (опубликована 30 ноября 2010 г.) при одобрении Комиссии по этике Института физиологии им. И.П. Павлова РАН (протокол № 03/13 от 13 марта 2023 г.). Животные группы ВЖР ($n=15$), ВЖР+Р ($n=10$) и ВЖР+К ($n=10$) получали в течение 8 нед ВЖР, который готовили из казеина (249 г/кг рациона), говяжьего жира (307 г/кг) и перловой крупы (442 г/кг). Энергетическая ценность ВЖР составила 5034 ккал/кг рациона, в том числе белков – 20%, жиров – 50%, углеводов – 30% от общей калорийности. Животные группы ВЖР+Р получали ежедневно 1 мл суспензии ресвератрола (50 мг/кг массы тела, GraFLab, РФ), группы ВЖР+К – 1 мл суспензии кверцетина (50 мг/кг массы тела, GraFLab, РФ) в дистиллированной воде внутрижелудочно через зонд, крысы из группы ВЖР – 1 мл дистиллированной воды также через зонд. Контролем служила группа крыс СР ($n=15$), содержащихся на стандартном рационе (СР, комбикорм ЛБК-120 по ГОСТ 34566-2019, ЗАО «Тосненский комбикормовый завод», РФ), которые также получали внутрижелудочно 1 мл дистиллированной воды. Энергетическая ценность комбикорма составляла 2920 ккал/кг, в том числе белков – 20%, жиров – 15%, углеводов – 65% от общей калорийности. Всех животных содержали в равных условиях в стандартных клетках, по 5 голов, они имели постоянный свободный доступ к корму и воде. Длительность наблюдения составляла 2 мес.

Таблица 1. Масса крыс, индекс массы висцерального жира, индекс массы миокарда и артериальное давление у крыс, получавших высокожировую рацион (ВЖР) ($M \pm m$)**Table 1.** Rat weight, visceral fat mass index, myocardial mass index, and blood pressure in rats fed a high-fat diet ($M \pm m$)

Показатель Index		CP / SD (n=15)	ВЖР / HFD (n=15)	ВЖР+Р / HFD+R (n=10)	ВЖР+К / HFD+Q (n=10)	p
		1	2	3	4	
Масса тела, г Body weight, g	исходная / initial	289±11	295±10	293±9	306±11	–
	через 8 нед / after 8 weeks	370±11	387±13	362±14	364±12	–
Индекс массы висцерального жира, мг/г Visceral fat mass index, mg/g		21,6±2,2	33,4±1,9	27,5±2,3	27,8±2,6	$p_{1-2}<0,001$ $p_{1-3}=0,034$ $p_{1-4}=0,042$ $p_{2-3}=0,012$ $p_{2-4}=0,018$
Индекс массы миокарда, мг/г Myocardial mass index, mg/g		2,67±0,08	2,85±0,08	2,74±0,13	2,79±0,09	$p_{1-2}=0,046$
Артериальное давление, мм рт.ст. Blood pressure, mmHg	исходное / baseline	120±5	118±6	119±4	121±5	–
	через 8 нед / after 8 weeks	123±4	140±5	124±3	123±4	$p_{1-2}<0,001$ $p_{2-3}<0,001$ $p_{2-4}<0,001$

Для измерения исходного АД, а также через 8 нед содержания на соответствующем рационе использовали систему «Систола» (ООО «Нейроботикс, РФ).

Методика оценки амплитуды дилатации брыжеечных артерий *in vivo* была подробно описана ранее [19]. Для оценки эндотелий-зависимой и эндотелий-независимой дилатации предварительно сокращенных фенилэфрином (1×10^{-5} М; Sigma-Aldrich, США) артерий использовали, соответственно, ацетилхолин (АХ, 1×10^{-5} М; Sigma-Aldrich, США) и нитропруссид натрия (НП, 1×10^{-6} М; ICN Biomedicals, США). Величину дилатации представляли в процентах от величины вызванной фенилэфрином констрикции. Для выяснения роли NO-зависимых механизмов вазодилатации были использованы гидрохлорид метилового эфира N ω -нитро-L-аргинина (L-NAME, 1×10^{-4} М; ICN Biomedicals, США) – блокатор NO-синтазы. Используя постепенное ступенчатое повышение концентрации АХ (с 1×10^{-10} до 1×10^{-5} М), оценивали кумулятивный эффект увеличения концентрации вазодилатора на реактивность сосудов.

Диаметр сосудов артерий крыс *in vivo* оценивали с помощью фото- и видеорегистрации с использованием микроскопа Биомед MC-1T-ZOOM («Биомед», РФ) и камеры BASLER acA4600-10uc (Basler, ФРГ), результаты обрабатывали с помощью программы MultiMedia Catalog (ММС, РФ).

По окончании исследования крыс декапитировали, собирали образцы крови и центрифугировали их для получения сыворотки, а также оценивали массу миокарда, забрюшинной и эпидидимальной жировой ткани и рассчитывали индексы массы как отношение массы органа к массе крысы (мг/г). Оценивали индекс массы миокарда (ИММ) и индекс массы висцерального жира (ИМВЖ). В сыворотке крови содержание триглицеридов, ЛПВП и ЛПНП, общего холестерина определяли на анализаторе ARCHITECT c8000 (Abbott Laboratories, США) энзиматическим колориметрическим методом, используя наборы (Abbott, США).

Для статистической обработки результатов использовали программу Statistica v.12. Данные представляли в виде среднего и его стандартной ошибки ($M \pm m$). Для сравнения показателей с нормальным распределением в исследуемых выборках использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с попарными *post-hoc* сравнениями по критерию Тьюки. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты

Проведенные исследования показали, что ни исходная, ни конечная масса тела через 8 нед кормления животных не различались (табл. 1). Несмотря на отсутствие общего ожирения, у крыс группы ВЖР ИМВЖ оказался наибольшим, тогда как применение ресвератрола и кверцетина привело к некоторому снижению ИМВЖ по сравнению с животными, получавшими ВЖР, однако этот показатель все-таки оказался в среднем на 27,3% выше, чем у крыс из группы СР.

Величина АД не имела различий между группами до начала эксперимента, но прием избыточного количества жиров привел к повышению АД на 13,8% у животных группы ВЖР, а применение полифенолов предупреждало гипертензивный эффект: уровень АД у животных групп ВЖР+Р и ВЖР+К не отличался от показателя контрольной группы СР.

У крыс группы ВЖР отмечалось ремоделирование миокарда: ИММ был в среднем выше на 6,7%, чем у контроля, однако у животных, получавших полифенолы, ИММ значимо не отличался от показателя контрольной группы.

Избыточное потребление жиров оказывало влияние на показатели липидного обмена: содержание триглицеридов в сыворотке крови было в 3,1 раза выше у животных из группы ВЖР по сравнению с показателем крыс контрольной группы СР (табл. 2). Применение полифе-

Таблица 2. Биохимические показатели крови крыс, получавших высокожировую рацион (ВЖР) ($M \pm m$)

Table 2. Biochemical parameters of blood in rats fed a high-fat diet (HFD) ($M \pm m$)

Показатель Index	CP / SD (n=15)	ВЖР / HFD (n=15)	ВЖР+Р / HFD+R (n=10)	ВЖР+К / HFD+Q (n=10)	p
	1	2	3	4	
Триглицериды, ммоль/л Triglycerides, mmol/l	0,59±0,08	1,81±0,12	0,91±0,08	0,99±0,13	$p_{1-2}<0,001$ $p_{1-3}=0,007$ $p_{1-4}<0,001$ $p_{2-3}<0,001$ $p_{3-4}<0,001$
Холестерин, ммоль/л Cholesterol, mmol/l	1,61±0,12	1,92±0,11	1,58±0,15	1,72±0,12	$p_{1-2}<0,001$ $p_{2-3}<0,001$ $p_{2-4}=0,047$
Липопротеины высокой плотности, ммоль/л High density lipoproteins, mmol/l	0,82±0,14	0,59±0,10	1,04±0,08	1,07±0,09	$p_{1-2}<0,001$ $p_{1-3}=0,008$ $p_{1-4}<0,001$ $p_{2-3}<0,001$ $p_{3-4}<0,001$
Липопротеины низкой плотности, ммоль/л Low density lipoproteins, mmol/l	0,42±0,04	0,54±0,05	0,28±0,04	0,32±0,05	$p_{1-2}=0,009$ $p_{1-3}=0,026$ $p_{1-4}=0,042$ $p_{2-3}<0,001$ $p_{2-4}<0,001$
Глюкоза натощак, ммоль/л Fasting glucose, mmol/l	5,8±0,2	6,6±0,2	5,3±0,5	5,6±0,4	$p_{1-2}<0,001$ $p_{2-3}<0,001$ $p_{2-4}=0,001$

нолов снижало выраженность триглицеридемии, однако их уровень остался значимо выше, чем у контрольных крыс. Прием ресвератрола и кверцетина также предотвращал подъем уровня общего холестерина, характерный для крыс, получавших ВЖР без добавок. Полифенолы оказывали влияние на уровень липопротеидов: концентрация ЛПВП повысилась, а ЛПНП была ниже, чем у крыс группы ВЖР, в крови которых уровень ЛПВП был ниже, а ЛПНП – выше, чем у контрольных животных. На фоне введения ресвератрола и кверцетина изменений уровня глюкозы в сыворотке крови не наблюдалось, тогда как у крыс группы ВЖР отмечался значимый рост этого показателя, однако говорить о гипергликемии неправомерно, поскольку показатель оставался в зоне нормальных референсных значений для крыс.

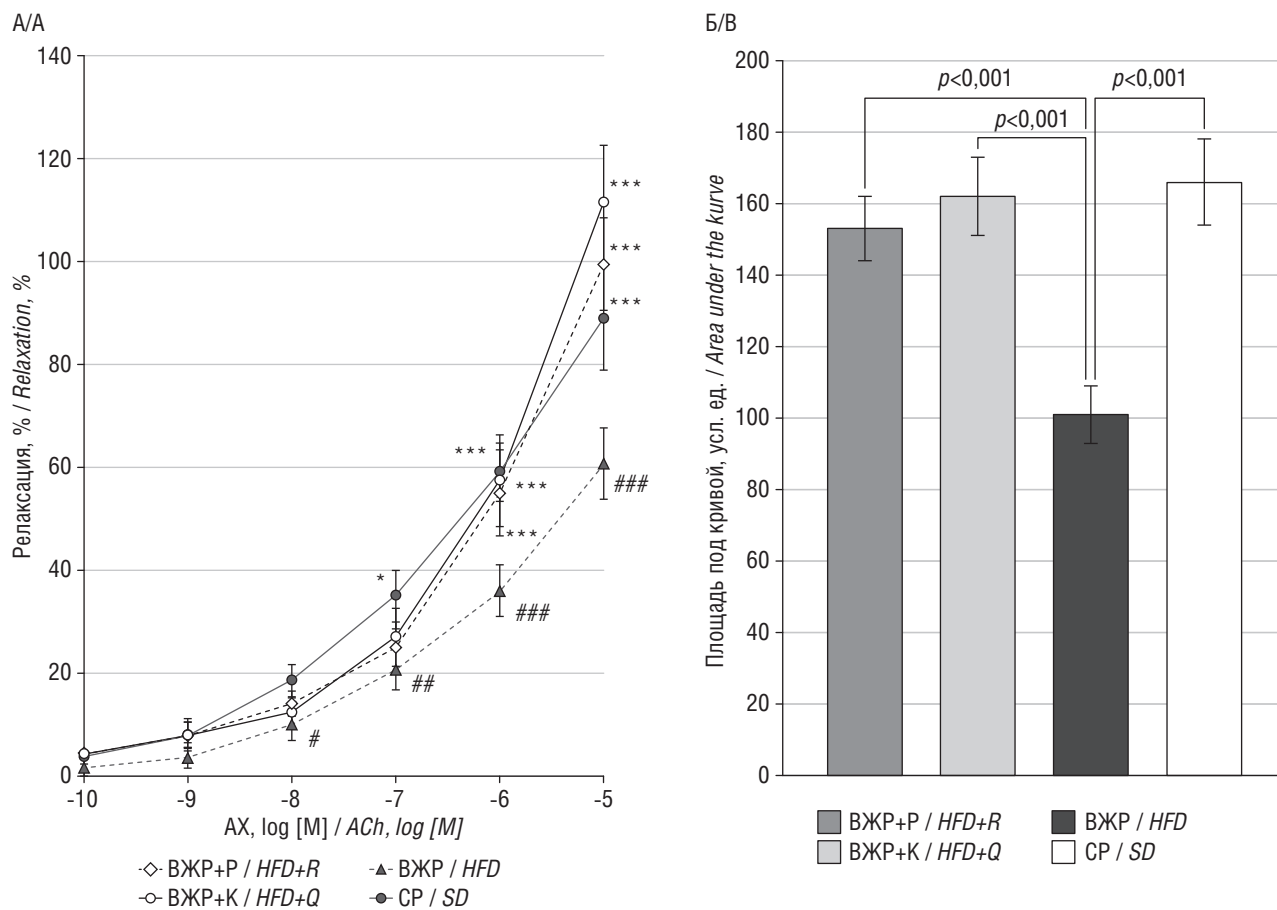
Исследование реактивности брыжеечных артерий проводили *in vivo*, используя АХ для оценки эндотелий-зависимой и НП – для эндотелий-независимой вазодилатации. АХ-индуцируемая релаксация оказалась сниженной у крыс группы ВЖР. Это различие проявлялось с концентрации АХ 10^{-8} М и при повышении содержания АХ в ванночке разница в амплитуде релаксации увеличивалась (см. рисунок). Применение полифенолов препятствовало характерному для высокожировой алиментарной нагрузки подавлению реакции на АХ, амплитуда значимо не отличалась от показателей группы СР. Расчет площади под кривой для АХ показал, что общая реактивность была снижена у крыс группы ВЖР в среднем на 39,1% по сравнению с контролем, а при применении полифенолов значимо не отличалась от показателя крыс, получавших СР.

Эффективность NO-зависимых механизмов дилатации брыжеечных артерий при развитии МС оценивали

путем сравнения амплитуды вазодилатации до и после блокады NO-синтазы инкубацией сосудов с L-NAME при концентрации АХ 10^{-5} М. Величина дилатации у крыс группы ВЖР была в среднем на 19,8% меньше, чем у контрольной группы, а при применении ресвератрола и кверцетина снижения вазодилатации не наблюдалось, амплитуда релаксации значимо не отличалась от контроля (табл. 3). Инкубация с L-NAME приводила к снижению релаксации, при этом у крыс группы ВЖР величина релаксации после блокады NO-синтазы оказалась больше, чем в остальных группах. Расчет разницы в дилатации до и после применения блокатора показал, что у животных группы ВЖР амплитуда релаксации снизилась меньше всего – на 46,6%, тогда как в контроле – на 68,7%, у животных группы ВЖД+Р – на 68,4%, ВЖР+К – на 71,3%. Вызванная НП дилатация не различалась между крысами всех исследованных групп.

Обсуждение

В исследовании проверяли гипотезу о возможном протективном эффекте приема полифенолов на факторы МС и функциональное состояние брыжеечных артерий при избыточном потреблении жиров. Эксперимент показал, что применение ресвератрола и кверцетина действительно снижает проявления МС, в частности уменьшает висцеральное ожирение, предотвращает рост АД. Использование полифенолов при высокожировой алиментарной нагрузке способствовало улучшению липидного обмена: снижалась выраженность триглицеридемии и гиперхолестеринемии, при этом увеличивался уровень ЛПВП и уменьшался ЛПНП по сравне-



Ацетилхолин-индуцированная дилатация брыжеечных артерий крыс, получавших высокожировую рацию (ВЖР)

А – амплитуда дилатации брыжеечных артерий при ступенчатом увеличении концентрации ацетилхолина, кумулятивный эффект. По оси ординат: амплитуда дилатации, выраженная в процентах от амплитуды предконстрикции сосудов фенилэфрином. Значимость различий по сравнению с показателем группы ВЖР: * – $p < 0,05$; *** – $p < 0,001$; по сравнению с контрольной группой (СР): # – $p < 0,05$; ### – $p < 0,001$; Б – площадь под кривой для ацетилхолина, усл.ед.

Acetylcholine-induced relaxation of mesenteric arteries in rats fed high-fat diet (HFD)

А – amplitude of mesenteric artery dilation with a stepwise increase in acetylcholine concentration, cumulative effect. Y-axis: dilation amplitude expressed as a percentage of the amplitude of vascular phenylephrine precontraction. The significance of the differences: compared with the HFD group: * – $p < 0,05$; *** – $p < 0,001$; compared with the control (SD) group: # – $p < 0,05$; ### – $p < 0,001$; B – area under the curve for acetylcholine, conventional units.

Таблица 3. Амплитуда вызванной ацетилхолином (АХ) и нитропруссидом натрия (НП) дилатации брыжеечных артерий крыс, получавших высокожировую рацию ($M \pm m$)

Table 3. Amplitude of dilation of mesenteric arteries caused by acetylcholine (ACh) and sodium nitroprusside (NP) in rats fed a high-fat diet ($M \pm m$)

Воздействие Agents	СР / SD (n=15)	ВЖР / HFD (n=15)	ВЖР+Р / HFD+R (n=15)	ВЖР+К / HFD+Q (n=15)	p
	1	2	3	4	
АХ, % / ACh, %	106,1±6,4	85,0±5,2	103,9±8,6	99,8±6,3	$p_{1-2} < 0,001$ $p_{2-3} = 0,004$ $p_{2-4} = 0,045$
АХ + L-NAME, % ACh + L-NAME, %	33,2±4,1	45,4±4,9	32,8±3,1	28,6±3,3	$p_{1-2} < 0,001$ $p_{2-3} < 0,001$ $p_{2-4} < 0,001$
НП, % / NP, %	50,5±5,2	46,1±3,3	43,3±6,9	41,1±6,4	–

П р и м е ч а н и е. Амплитуда дилатации брыжеечных артерий выражается в процентах от амплитуды предконстрикции на фенилэфрин.

N o t e. The amplitude of mesenteric artery dilation is expressed as a percentage of the amplitude of precontraction on phenylephrine.

нию с крысами, получавшими ВЖР без полифенолов. Полученные нами результаты согласуются с данными литературы, в которых рассматривается стабилизирующий липидный и углеводный обмен эффект применения полифенолов у людей и животных при заболеваниях, ассоциированных с метаболическими нарушениями [4, 20], и, в частности, при высокожировой диете [21]. Показано, что при сахарном диабете полифенолы способны оказывать влияние на углеводный обмен путем модулирования абсорбции глюкозы в кишечнике, изменяя активность α -амилазы, SGLT1, GLUT2 [22]. Кроме того, показана способность полифенолов, в частности ресвератрола, снижать инсулинрезистентность при ВЖР у крыс уже через 8 нед приема [21].

Оценка реактивности сосудов у крыс, получавших ВЖР, показала, что прием полифенолов при высокожировой алиментарной нагрузке в течение 8 нед действительно снижает выраженность эндотелиальной дисфункции, проявляющейся в подавлении АХ-индуцированной вазодилатации. Если у крыс, получавших только ВЖР, амплитуда релаксации снижалась по сравнению с группой, получающей СР, то применение полифенолов предупреждало падение вазодилатации на действие АХ, сохраняя реактивность брыжеечных артерий на уровне контрольных животных. При предварительной блокаде NO-синтазы инкубацией сосудов с L-NAME показано, что снижение величины вазодилатации на АХ после применения блокатора было наименьшим у крыс группы ВЖР, тогда как при применении ресвератрола и кверцетина снижение амплитуды после L-NAME было сходным с таковым у контрольных животных. Это позволяет говорить о том, что эндотелиальная дисфункция при приеме ВЖР связана с нарушением NO-зависимого механизма дилатации. Эффективность этого пути релаксации определяется 2 основными факторами: синтезом NO эндотелием и чувствительностью гладкомышечных клеток (ГМК) к NO. Отсутствие различий между реакцией сосудов крыс исследованных групп на НП свидетельствует о сохранении чувствительности ГМК к NO при ВЖР, а протективное действие полифенолов проявляется путем сохранения продукции NO эндотелием. В литературе обсуждается способность полифенолов, в частности ресвератрола, стимулировать синтез NO эндотелием [23].

Полифенолы как препараты полимодального действия модулируют функциональное состояние сосудов различными путями: например, действуя непосредственно на сосуды, проявляя вазодилататорный эффект, либо опосредованно через влияние на состояние углеводного и липидного обмена, а также через противовоспалительное и антиоксидантное действие. Эффект полифенолов непосредственно на сосуды зависит от типа сосуда [24], в частности действие кверцетина на брыжеечные артерии более выражено, чем на проводящие артерии, например на аорту [25], а в настоящем исследовании была оценена реактивность именно брыжеечных артерий. Считается, что кверцетин вызывает вазодилатацию, не связанную с эндотелием. Так, релак-

сирующий эффект кверцетина сохраняется после дезэндотелизации сосуда, а после применения блокаторов гуанилатциклазы и аденилатциклазы, KCl и убаина величина дилатации на кверцетин и его метаболиты значительно не изменялась [25]. Следует учитывать, что в условиях длительного приема полифенолов в организме накапливаются продукты их обмена, которые, в свою очередь, также могут действовать на артерии, при этом дилататорные эффекты данных метаболитов могут быть более выражены, чем у самого полифенола [25]. Механизм непосредственного дилатирующего действия кверцетина на сосуды, как полагают, не связан с влиянием на внутриклеточную концентрацию кальция, а определяется воздействием этого полифенола на активность киназ в ГМК, а именно способностью полифенолов ингибировать протеинкиназу, в частности киназу легкой цепи миозина [26]. Ресвератрол также обладает дилатирующим действием, например, показано, что он расширяет артериолы сетчатки крыс [27].

Помимо непосредственного эндотелий-независимого дилататорного действия полифенолов на сосуды, ресвератрол и кверцетин могут модулировать функциональное состояние сосудов опосредованно, через их противовоспалительные, антиоксидантные, антиатерогенные эффекты. Показано, что при МС наблюдается развитие воспаления, окислительного стресса, что существенно влияет на состояние эндотелия и сосудов [28]. Реактивность сосудов в значительной степени снижается при развитии воспаления, повышении образования свободных радикалов, которые оказывают негативное влияние на функцию эндотелия. При этом нарушаются процессы синтеза вазоактивных веществ эндотелием, динамический баланс между дилататорными и констрикторными влияниями на ГМК сдвигается в сторону повышения тонуса сосудов, способствуя развитию артериальной гипертензии. Протективный эффект потребления полифенолов в отношении снижения воспаления показан, например, у мышей при высокожировой алиментарной нагрузке [29].

Заключение

Таким образом, наши данные показали, что прием полифенолов снижает выраженность факторов МС у крыс Wistar: улучшает липидный обмен, снижает висцеральное ожирение и предотвращает рост АД. Использование полифенолов предупреждает характерную для ВЖР эндотелиальную дисфункцию, препятствуя угнетению дилатации брыжеечных артерий на АХ, при этом протективный эффект ресвератрола и кверцетина на сосуды при ВЖР может опосредоваться как сохранением нормальной активности NO-синтазы в эндотелии, так и непосредственным эндотелий-независимым дилатирующим эффектом полифенолов на ГМК брыжеечных артерий. Прием полифенолов может быть рассмотрен как метод профилактики и комплексного лечения опасных нарушений функции сердечно-сосудистой системы при заболеваниях, вызванных избыточным потреблением жиров.

Литература

1. Bovolini A., Garcia J., Andrade M.A., Duarte J.A. Metabolic syndrome pathophysiology and predisposing factors // *Int. J. Sports Med.* 2021. Vol. 42, N 3. P. 199–214. DOI: <https://doi.org/10.1055/a-1263-0898>
2. Pigeot I., Ahrens W. Epidemiology of metabolic syndrome // *Pflügers Arch.* 2025. Vol. 477, N 5. P. 669–680. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00424-024-03051-7>
3. Asgary S., Karimi R., Momtaz S., Naseri R., Farzaei M.H. Effect of resveratrol on metabolic syndrome components: a systematic review and meta-analysis // *Rev. Endocr. Metab. Disord.* 2019. Vol. 20, N 2. P. 173–186. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11154-019-09494-z>
4. Иванова Г.Т. Протективное действие белков сои при избыточном количестве жиров в рационе крыс // *Вопросы питания.* 2024. Т. 93, № 5. С. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-5-25-34>
5. Бобышева Т.Н., Анисимов Г.С., Золотарева М.С., Бобрышев Д.В., Будкевич Р.О., Москалева А.А. Полифенолы как перспективные биологически активные соединения // *Вопросы питания.* 2023. Т. 92, № 1. С. 92–107. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-92-107>
6. Singh A.P., Singh R., Verma S.S., Rai V., Kaschula C.H., Maiti P., Gupta S.C. Health benefits of resveratrol: evidence from clinical studies // *Med. Res. Rev.* 2019. Vol. 39. P. 1851–1891. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0027666>
7. Sharma A., Sharma P., Singh Tuli H., Sharma A.K. Phytochemical and pharmacological properties of flavonols // *eLS: Encyclopedia of Life Sciences.* Chichester: John Wiley and Sons, 2018. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0027666>
8. Javkhedkar A.A., Quiroz Y., Rodriguez-Iturbe B., Vaziri N.D., Lokhandwala M.F., Banday A.A. Resveratrol restored Nrf2 function, reduced renal inflammation, and mitigated hypertension in spontaneously hypertensive rats // *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2015. Vol. 308, N 10. P. R840–R846. DOI: <https://doi.org/10.1152/ajp-regu.00308.2014>
9. Dolinsky V.W., Chakrabarti S., Pereira T.J., Oka T., Levasseur J., Beker D. et al. Resveratrol prevents hypertension and cardiac hypertrophy in hypertensive rats and mice // *Biochim. Biophys. Acta.* 2013. Vol. 1832, N 10. P. 1723–1733. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2013.05.018>
10. Zhou D.-D., Luo M., Huang S.-Y., Saimaiti A., Shang A., Gan R.-Y. et al. Effects and mechanisms of resveratrol on aging and age-related diseases // *Oxid. Med. Cell. Longev.* 2021. Vol. 2021. Article ID 9932218. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9932218>
11. Li Y., Yao J., Han C., Yang J., Chaudhry M.T., Wang S. et al. Quercetin, inflammation and immunity // *Nutrients.* 2016. Vol. 8, N 3. P. 167. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu8030167>
12. Cui Z., Zhao X., Amevor F.K., Du X., Wang Y., Li D. et al. Therapeutic application of quercetin in aging-related diseases: SIRT1 as a potential mechanism // *Front. Immunol.* 2022. Vol. 13. Article ID 943321. DOI: <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.943321>
13. Yan L., Vaghari-Tabari M., Malakoti F., Moein S., Quijé D., Yousefi B. et al. Quercetin: an effective polyphenol in alleviating diabetes and diabetic complications // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2023. Vol. 63, N 28. P. 9163–9186. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2067825>
14. Rodrigo R., Retamal C., Schupper D., Vergara-Hernandez D., Saha S., Profumo E. et al. Antioxidant cardioprotection against reperfusion injury: potential therapeutic roles of resveratrol and quercetin // *Molecules.* 2022. Vol. 27, N 8. P. 2564. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27082564>
15. Azizidoost S., Adelipour M., Haybar H., Shabaninejad Z., Rashidi M. Implications of quercetin in mitigating myocardial ischemia-reperfusion injury: a review study // *Adv. Biomed. Res.* 2025. Vol. 14. P. 17. DOI: https://doi.org/10.4103/abr.abr_166_24
16. Martiniakova M., Sarocka A., Penzes N., Biro R., Kovacova V., Mondockova V., Sevcikova A. et al. Protective role of dietary polyphenols in the management and treatment of type 2 diabetes mellitus // *Nutrients.* 2025. Vol. 17, N 2. P. 275. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu17020275>
17. Breuss J.M., Atanasov A.G., Uhrin P. Resveratrol and its effects on the vascular system // *Int. J. Mol. Sci.* 2019. Vol. 20, N 7. P. 1523. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms20071523>
18. Rubio-Ruiz M.E., Guarner-Lans V., Cano-Martínez A., Díaz-Díaz E., Manzano-Pech L., Gamas-Magaña A. et al. Resveratrol and quercetin administration improves antioxidant DEFENSES and reduces fatty liver in metabolic syndrome rats // *Molecules.* 2019. Vol. 24. P. 1297. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24071297>
19. Ivanova G.T. Reactivity of mesenteric arteries in the development of metabolic syndrome in rats fed on a high-fat diet // *J. Evol. Biochem. Phys.* 2023. Vol. 59, N 1. P. 154–164. <https://doi.org/10.1134/S0022093023010131>
20. Szkudelski T., Szkudelska K. Resveratrol and diabetes: from animal to human studies // *Biochim. Biophys. Acta.* 2015. Vol. 1852, N 6. P. 1145–1154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2014.10.013>
21. Kong W., Chen L.L., Zheng J., Zhang H.H., Hu X., Zeng T.S., Hu D. Resveratrol supplementation restores high-fat diet-induced insulin secretion dysfunction by increasing mitochondrial function in islet // *Exp. Biol. Med.* (Maywood). 2015. Vol. 240, N 2. P. 220–229. DOI: <https://doi.org/10.1177/1535370214548998>
22. Hanhineva K., Törrönen R., Bondia-Pons I., Pekkinen J., Kolehmainen M., Mykkänen H. et al. Impact of dietary polyphenols on carbohydrate metabolism // *Int. J. Mol. Sci.* 2010. Vol. 11, N 4. P. 1365–1402. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms11041365>
23. Li H., Xia N., Hasselwander S., Daiber A. Resveratrol and vascular function // *Int. J. Mol. Sci.* 2019. Vol. 20, N 9. P. 2155. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms20092155>
24. Mkhize S.A., Nthlane R.A., Xhakaza S.P., Verhaert P.D., Baijnath S., Millen A.M.E. et al. Decreased blood pressure with acute administration of quercetin in L-NAME-induced hypertensive rats // *Basic Clin. Pharmacol. Toxicol.* 2025. Vol. 136, N 1. Article ID e14113. DOI: <https://doi.org/10.1111/bcpt.14113>
25. Pérez-Vizcaino F., Ibarra M., Cogolludo A.L., Duarte J., Zaragoza-Arnáez F., Moreno L. et al. Endothelium-independent vasodilator effects of the flavonoid quercetin and its methylated metabolites in rat conductance and resistance arteries // *J. Pharmacol. Exp. Ther.* 2002. Vol. 302, N 1. P. 66–72. DOI: <https://doi.org/10.1124/jpet.302.1.66>
26. Hagiwara M., Inoue S., Tanaka T., Nunoki K., Ito M., Hidaka H. Differential effects of flavonoids as inhibitors of tyrosine protein kinases and serine/threonine protein kinases // *Biochem. Pharmacol.* 1988. Vol. 37, N 15. P. 2987–2992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0006-2952\(88\)90286-9](https://doi.org/10.1016/0006-2952(88)90286-9)
27. Mori A., Ezawa Y., Asano D., Kanamori T., Morita A., Kashiwara T. et al. Resveratrol dilates arterioles and protects against N-methyl-D-aspartic acid-induced excitotoxicity in the rat retina // *Neurosci. Lett.* 2023. Vol. 793. Article ID 136999. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2022.136999>
28. Kwaifa I.K., Bahari H., Yong Y.K., Noor S.M. Endothelial dysfunction in obesity-induced inflammation: molecular mechanisms and clinical implications // *Biomolecules.* 2020. Vol. 10, N 2. P. 291. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom10020291>
29. Andrade J.M., Paraiso A.F., de Oliveira M.V., Martins A.M., Neto J.F., Guimaraes A.L. et al. Resveratrol attenuates hepatic steatosis in high-fat fed mice by decreasing lipogenesis and inflammation // *Nutrition.* 2014. Vol. 30. P. 915–919. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nut.2013.11.016>

References

1. Bovolini A., Garcia J., Andrade M.A., Duarte J.A. Metabolic syndrome pathophysiology and predisposing factors. *Int J Sports Med.* 2021; 42 (3): 199–214. DOI: <https://doi.org/10.1055/a-1263-0898>
2. Pigeot I., Ahrens W. Epidemiology of metabolic syndrome. *Pflügers Arch.* 2025; 477 (5): 669–80. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00424-024-03051-7>
3. Asgary S., Karimi R., Momtaz S., Naseri R., Farzaei M.H. Effect of resveratrol on metabolic syndrome components: a systematic review and meta-analysis. *Rev Endocr Metab Disord.* 2019; 20 (2): 173–86. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11154-019-09494-z>
4. Ivanova G.T. Protective effect of soy proteins under excessive amount of fats in the diet of rats. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition].* 2024; 93 (5): 25–34. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-5-25-34> (in Russian)
5. Bobrysheva T.N., Anisimov G.S., Zolotareva M.S., Bobryshev D.V., Budkevich R.O., Moskalev A.A. Polyphenols as promising bioactive compounds. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition].* 2023; 92 (1): 92–107. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-92-107> (in Russian)
6. Singh A.P., Singh R., Verma S.S., Rai V., Kaschula C.H., Maiti P., Gupta S.C. Health benefits of resveratrol: evidence from clinical studies. *Med Res Rev.* 2019; 39: 1851–91. DOI: <https://doi.org/10.1002/med.21565>
7. Sharma A., Sharma P., Singh Tuli H., Sharma A.K. Phytochemical and pharmacological properties of flavonols. In: *eLS: Encyclopedia of Life Sciences.* Chichester: John Wiley and Sons, 2018: 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0027666>
8. Javkhedkar A.A., Quiroz Y., Rodriguez-Iturbe B., Vaziri N.D., Lokhandwala M.F., Banday A.A. Resveratrol restored Nrf2 function,

- reduced renal inflammation, and mitigated hypertension in spontaneously hypertensive rats. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 2015; 308 (10): R840–6. DOI: <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00308.2014>
9. Dolinsky V.W., Chakrabarti S., Pereira T.J., Oka T., Levasseur J., Beker D., et al. Resveratrol prevents hypertension and cardiac hypertrophy in hypertensive rats and mice. *Biochim Biophys Acta*. 2013; 1832 (10): 1723–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2013.05.018>
10. Zhou D.-D., Luo M., Huang S.-Y., Saimaiti A., Shang A., Gan R.-Y., et al. Effects and mechanisms of resveratrol on aging and age-related diseases. *Oxid Med Cell Longev*. 2021; 2021: 9932218. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9932218>
11. Li Y., Yao J., Han C., Yang J., Chaudhry M.T., Wang S., et al. Quercetin, inflammation and immunity. *Nutrients*. 2016; 8 (3): 167. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu8030167>
12. Cui Z., Zhao X., Ameer F.K., Du X., Wang Y., Li D., et al. Therapeutic application of quercetin in aging-related diseases: SIRT1 as a potential mechanism. *Front Immunol*. 2022; 13: 943321. DOI: <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.943321>
13. Yan L., Vaghari-Tabari M., Malakoti F., Moein S., Qujeq D., Yousefi B., et al. Quercetin: an effective polyphenol in alleviating diabetes and diabetic complications. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2023; 63 (28): 9163–86. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2067825>
14. Rodrigo R., Retamal C., Schupper D., Vergara-Hernandez D., Saha S., Profumo E., et al. Antioxidant cardioprotection against reperfusion injury: potential therapeutic roles of resveratrol and quercetin. *Molecules*. 2022; 27 (8): 2564. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27082564>
15. Azizidoost S., Adelipour M., Haybar H., Shabanejad Z., Rashidi M. Implications of quercetin in mitigating myocardial ischemia-reperfusion injury: a review study. *Adv Biomed Res*. 2025; 14: 17. DOI: https://doi.org/10.4103/abr.abr_166_24
16. Martiniakova M., Sarocka A., Penzes N., Biro R., Kovacova V., Mondockova V., Sevcikova A., et al. Protective role of dietary polyphenols in the management and treatment of type 2 diabetes mellitus. *Nutrients*. 2025; 17 (2): 275. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu17020275>
17. Breuss J.M., Atanasov A.G., Uhrin P. Resveratrol and its effects on the vascular system. *Int J Mol Sci*. 2019; 20 (7): 1523. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms20071523>
18. Rubio-Ruiz M.E., Guarner-Lans V., Cano-Martínez A., Díaz-Díaz E., Manzano-Pech L., Gamas-Magaña A., et al. Resveratrol and quercetin administration improves antioxidant DEFENSES and reduces fatty liver in metabolic syndrome rats. *Molecules*. 2019; 24: 1297. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24071297>
19. Ivanova G.T. Reactivity of mesenteric arteries in the development of metabolic syndrome in rats fed on a high-fat diet. *J Evol Biochem Phys*. 2023; 59 (1): 154–64. <https://doi.org/10.1134/S0022093023010131>
20. Szkudelski T., Szkudelska K. Resveratrol and diabetes: from animal to human studies. *Biochim Biophys Acta*. 2015; 1852 (6): 1145–54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2014.10.013>
21. Kong W., Chen L.L., Zheng J., Zhang H.H., Hu X., Zeng T.S., Hu D. Resveratrol supplementation restores high-fat diet-induced insulin secretion dysfunction by increasing mitochondrial function in islet. *Exp Biol Med (Maywood)*. 2015; 240 (2): 220–9. DOI: <https://doi.org/10.1177/1535370214548998>
22. Hanhineva K., Törrönen R., Bondia-Pons I., Pekkinen J., Kolehmainen M., Mykkänen H., et al. Impact of dietary polyphenols on carbohydrate metabolism. *Int J Mol Sci*. 2010; 11 (4): 1365–402. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms11041365>
23. Li H., Xia N., Hasselwander S., Daiber A. Resveratrol and vascular function. *Int J Mol Sci*. 2019; 20 (9): 2155. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms20092155>
24. Mkhize S.A., Nthlane R.A., Xhakaza S.P., Verhaert P.D., Baijnath S., Millen A.M.E., et al. Decreased blood pressure with acute administration of quercetin in L-NAME-induced hypertensive rats. *Basic Clin Pharmacol Toxicol*. 2025; 136 (1): e14113. DOI: <https://doi.org/10.1111/bcpt.14113>
25. Pérez-Vizcaíno F., Ibarra M., Cogolludo A.L., Duarte J., Zaragoza-Arnáez F., Moreno L., et al. Endothelium-independent vasodilator effects of the flavonoid quercetin and its methylated metabolites in rat conductance and resistance arteries. *J Pharmacol Exp Ther*. 2002; 302 (1): 66–72. DOI: <https://doi.org/10.1124/jpet.302.1.66>
26. Hagiwara M., Inoue S., Tanaka T., Nunoki K., Ito M., Hidaka H. Differential effects of flavonoids as inhibitors of tyrosine protein kinases and serine/threonine protein kinases. *Biochem Pharmacol*. 1988; 37 (15): 2987–92. DOI: [https://doi.org/10.1016/0006-2952\(88\)90286-9](https://doi.org/10.1016/0006-2952(88)90286-9)
27. Mori A., Ezawa Y., Asano D., Kanamori T., Morita A., Kashihara T., et al. Resveratrol dilates arterioles and protects against N-methyl-D-aspartic acid-induced excitotoxicity in the rat retina. *Neurosci Lett*. 2023; 793: 136999. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2022.136999>
28. Kwaifa I.K., Bahari H., Yong Y.K., Noor S.M. Endothelial dysfunction in obesity-induced inflammation: molecular mechanisms and clinical implications. *Biomolecules*. 2020; 10 (2): 291. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom10020291>
29. Andrade J.M., Paraiso A.F., de Oliveira M.V., Martins A.M., Neto J.F., Guimaraes A.L., et al. Resveratrol attenuates hepatic steatosis in high-fat fed mice by decreasing lipogenesis and inflammation. *Nutrition*. 2014; 30: 915–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nut.2013.11.016>

Для корреспонденции

Горбачева Ирина Васильевна – кандидат медицинских наук,
доцент кафедры фундаментальной и клинической
биохимии с лабораторной диагностикой ФГБОУ ВО СамГМУ
Минздрава России
Адрес: 443099, Российская Федерация, г. Самара,
ул. Чапаевская, д. 89
Телефон: (846) 374-10-04, доб. 4454
E-mail: i.v.gorbacheva@samsmu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8267-9250>

Кузнецова О.Ю., Горбачева И.В., Гильмиярова Ф.Н.

Белково-энергетическая недостаточность у детей первого года жизни как фактор риска дислиппротеинемии

Protein-energy deficiency
in children of the first
year of life as a risk factor
for dislipoproteinemia

Kuznetsova O.Yu., Gorbacheva I.V.,
Gilmiyarova F.N.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 443099, г. Самара, Российская Федерация

Samara State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, 443099, Samara, Russian Federation

Первенство в общей структуре смертности заболеваний сердечно-сосудистой системы среди популяций экономически развитых стран оставляет актуальной проблему атеросклероза, среди факторов риска развития которого особое место отводится дислиппротеинемии.

Цель исследования – выявить особенности липидного спектра сыворотки крови у детей грудного возраста с белково-энергетической недостаточностью (БЭН). **Материал и методы.** У 107 детей с острой формой БЭН (60 мальчиков и 47 девочек) и 30 здоровых детей с нормальными показателями физического развития без острых заболеваний (18 мальчиков и 12 девочек) в возрасте от 1 до 12 мес жизни были исследованы параметры липидного обмена: концентрация в сыворотке крови триацилглицеринов (ТАГ), общего холестерина (ОХ), холестерина липопротеинов высокой (ХС-ЛПВП), низкой (ХС-ЛПНП) и очень низкой плотности (ХС-ЛПОНП). У 48 детей дефицит массы тела

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Концепция и дизайн исследования – Гильмиярова Ф.Н., Кузнецова О.Ю., Горбачева И.В.; сбор и обработка данных, написание текста – Горбачева И.В., Кузнецова О.Ю.; редактирование, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи – все авторы.

Для цитирования: Кузнецова О.Ю., Горбачева И.В., Гильмиярова Ф.Н. Белково-энергетическая недостаточность у детей первого года жизни как фактор риска дислиппротеинемии // Вопросы питания. 2025. Т. 94, № 6. С. 37–46. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-37-46>

Статья поступила в редакцию 03.07.2025. **Принята в печать** 20.10.2025.

Funding. The study was not sponsored.

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

Contribution. The concept and design of the study – Gilmiyarova F.N., Kuznetsova O.Yu., Gorbacheva I.V.; data collection and processing, writing the text – Gorbacheva I.V., Kuznetsova O.Yu.; editing, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article – all authors.

For citation: Kuznetsova O.Yu., Gorbacheva I.V., Gilmiyarova F.N. Protein-energy deficiency in children of the first year of life as a risk factor for dislipoproteinemia. *Voprosy pitaniia* [Problems of Nutrition]. 2025; 94 (6): 37–46. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-37-46> (in Russian)

Received 03.07.2025. **Accepted** 20.10.2025

соответствовал БЭН I степени тяжести, у 42 – II степени, у 17 – III степени. Критерии не включения в обследование: хромосомные и генетические заболевания, врожденные пороки развития, острые инфекционные заболевания.

Результаты. При острой форме БЭН у детей грудного возраста концентрация ОХ и ХС-ЛПВП не отличается от показателей детей из группы сравнения и характеризуется стабильностью. Уровень ТАГ значительно снижен при I степени БЭН (-33% ; $p \leq 0,05$), стабилизируется при II степени. Существенное снижение содержания ТАГ при III степени БЭН (-36% ; $p \leq 0,05$) отражает исчерпание резерва адаптации. Уменьшение концентрации ХС-ЛПОНП и увеличение ХС-ЛПНП наиболее выражено при III степени БЭН (-31% ; $p \leq 0,05$; $+85\%$; $p \leq 0,05$). У мальчиков при БЭН выявлено повышение уровня как ХС-ЛПОНП, так и ХС-ЛПНП ($+45\%$; $p \leq 0,05$; $+85\%$; $p \leq 0,05$ соответственно). У девочек возрастание концентрации ХС-ЛПНП сочетается со снижением содержания ХС-ЛПОНП ($+40\%$; $p \leq 0,05$; -56% ; $p \leq 0,05$ соответственно). При этом дислиппротеинемия по атерогенному типу формируется только у детей с БЭН в возрасте до 6 мес.

Заключение. Развитие БЭН у детей первого полугодия жизни приводит к изменению метаболического статуса по атерогенному типу, что наиболее характерно для мальчиков (не затрагивая девочек) и при тяжелой степени БЭН. Данная метаболическая перестройка формирует риск развития атеросклероза в последующие возрастные периоды.

Ключевые слова: белково-энергетическая недостаточность; атеросклероз; дислиппротеинемия; дети грудного возраста; триацилглицерины; общий холестерин; холестерин липопротеинов высокой плотности; холестерин липопротеинов низкой плотности; холестерин липопротеинов очень низкой плотности

The prevalence of cardiovascular diseases (CVD) in the overall mortality rate among populations in economically developed countries highlights the importance of atherosclerosis, with dyslipoproteinemia being a key risk factor.

The purpose of the research was to identify the features of the blood serum lipid spectrum in infants with protein-energy malnutrition (PEM).

Material and methods. In 107 children with acute PEM aged 1 to 12 months (60 boys and 47 girls), and 30 healthy children with normal physical development without acute diseases (18 boys and 12 girls), the blood serum parameters of lipid metabolism were studied: triacylglycerols (TAG), total cholesterol (TC), high-density lipoprotein cholesterol (HDL-C), low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C) and very-low-density lipoprotein cholesterol (VLDL-C). In 48 children, body weight deficit corresponded to degree I, in 42 – II, in 17 – III. Exclusion criteria for the survey: chromosomal and genetic diseases, congenital malformations, acute infectious diseases.

Results. In acute PEM in infants, the TC and HDL-C level does not differ from the indicators of children from the control group and is characterized by stability. The TAG level is significantly decreased at grade I PEM (-33% ; $p \leq 0.05$), stabilizes at grade II. The significant TAG decrease at grade III (-36% ; $p \leq 0.05$) reflects the depletion of the adaptation reserve during PEM. The decrease in VLDL-C and the increase in LDL-C are most pronounced at stage III PEM (-31% ; $p \leq 0.05$; $+85\%$; $p \leq 0.05$). In boys with PEM, an increase in both VLDL-C and LDL-C was found ($+45\%$; $p \leq 0.05$; $+85\%$; $p \leq 0.05$, respectively). In girls, an increase in LDL-C is combined with a decrease in VLDL-C ($+40\%$; $p \leq 0.05$; -56% ; $p \leq 0.05$, respectively). At the same time, dyslipidemia of the atherogenic type is formed only in children with PEM under 6 months of age.

Conclusion. The development of PEM in children of the first half year of life leads to a change in the metabolic status of the atherogenic type, which is most typical for boys, without affecting the category of girls, and with a severe degree of PEM. This metabolic restructuring indicates the risk of developing atherosclerosis in subsequent age periods.

Keywords: protein-energy malnutrition; atherosclerosis; dyslipoproteinemia; infants; triacylglycerols; total cholesterol; high-density lipoprotein cholesterol; low-density lipoprotein cholesterol; very-low-density lipoprotein cholesterol

Согласно результатам популяционных исследований в экономически развитых странах мира среди причин смертности лидерство по-прежнему остается за заболеваниями сердечно-сосудистой системы (ССС), среди них доминируют нозологии, морфологической основой которых является атеро-

склероз (ишемическая болезнь сердца, инфаркт миокарда, инсульт) [1]. В Российской Федерации в общей структуре смертности на долю заболеваний ССС приходится 46,8% [2].

Впервые клинически атеросклероз обычно дебютирует у взрослых, когда он приобретает характер

стенозирующего, причем первые же его проявления могут носить сразу фатальный характер (внезапная смерть) [3]. Однако осложненные формы атеросклероза при семейной гиперхолестеринемии могут встречаться уже в детском возрасте [4].

В формировании заболеваний ССС, патогенетически связанных с атеросклерозом, выделяют как немодифицируемые (пол, возраст, отягощенная наследственность), так и модифицируемые факторы риска (дислипидемия, артериальная гипертензия, курение, сахарный диабет 2 типа, гипотиреоз, ожирение, гиподинамия) [5]. Снижение смертности более чем в 2 раза за десятилетие в ряде стран Европы показало большую эффективность коррекции факторов риска относительно лечения уже развившихся заболеваний [2].

Одним из ведущих фактов риска атеросклероза признается дислипидотеинемия. Акцентируется важность и перспективность дифференцировки наследственных и приобретенных дислипидотеинемий, тактика лечения которых принципиально различается, так как в случае последних возможно полное исключение причины их возникновения [5–7].

Особенность атеросклероза заключается в латентном бессимптомном периоде, который может длиться в течение многих лет, напоминая подводную часть айсберга. Атерогенез может начинаться даже в детском возрасте [8–10]. При этом стадии липоидной инфильтрации, когда появляются липидные пятна и полосы в артериях, предшествует безлипидная, которая может возникать уже в раннем детском возрасте [10, 11] или даже во внутриутробный период [12]. Э.А. Юрьева и соавт. (2014) так формулируют проблему: «Атеросклероз – детское заболевание, которое проявляется в более позднем возрасте» [9].

Однако, несмотря на многолетнюю историю изучения, проблема атеросклероза еще далека от своего разрешения, многие стороны его этиологии и патогенеза остаются неизвестными или не до конца выясненными. По-прежнему актуальна проблема ранней диагностики данного заболевания, выявления предикторов донозологической стадии.

Среди вторичных факторов риска атеросклероза у детей среди прочих отводится место ожирению [5, 6], что является спорным [13]. В то же время при генетически обусловленной семейной гиперхолестеринемии даже при отсутствии избыточной массы тела формируются дислипидотеинемии, приводящие к раннему развитию атеросклероза и заболеваний ССС [4]. Вместе с тем недостаточное внимание уделяется изучению особенностей липидного спектра у детей с нарушением пищевого статуса, сопровождающегося снижением массы тела. Ряд исследований привлекает к этому внимание [14, 15].

Цель исследования – выявить особенности липидного спектра сыворотки крови у детей грудного возраста с белково-энергетической недостаточностью (БЭН).

Материал и методы

Проведено клинико-лабораторное обследование 107 детей с острой формой БЭН эндогенного характера в возрасте от 1 до 12 мес (60 мальчиков и 47 девочек; средний возраст $6,1 \pm 3,2$ мес), среди них было 58 детей первого полугодия жизни ($M \pm m$ $3,6 \pm 1,6$ мес) и 49 детей второго полугодия жизни ($M \pm m$ $9,2 \pm 2,7$ мес). У всех детей гестационный возраст при рождении был более 38 нед. Все законные представители детей предоставили информированное добровольное согласие на участие. Обследование проведено на базе кафедры фундаментальной и клинической биохимии с лабораторной диагностикой ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава России, ГБУЗ «Самарская областная клиническая больница им. В.Д. Середавина» (отделение детей младшего возраста).

Основную группу составили 48 детей с БЭН I степени, 42 ребенка – с БЭН II степени, тяжелая БЭН была диагностирована у 17 детей.

Основным критерием включения был дефицит массы тела более 10% от должноствующей.

Критерии не включения в обследование: хромосомные и генетические заболевания, врожденные пороки развития, острые инфекционные заболевания.

Группу сравнения составили 30 детей (18 мальчиков и 12 девочек) в возрасте до года ($6,1 \pm 3,2$ мес), за исключением новорожденных, с нормальными ростовесовыми показателями, соответствующими возрасту, и без хронических и острых инфекционных заболеваний; среди них 17 детей были в возрасте от 2 до 5 мес ($4,2 \pm 2,1$ мес), 13 детей – от 6 до 11 мес ($7,8 \pm 3,1$ мес).

Этиологическими факторами БЭН были нарушения здоровья матери в период беременности (состояние железодефицита, хронические соматические заболевания, гестоз, угроза прерывания беременности); внутриутробные инфекции, непродолжительность естественного вскармливания и раннее введение прикорма, синдром нарушения переваривания и всасывания. На момент поступления на смешанном вскармливании в первые 3 мес находились 50% детей, в возрасте с 3 до 6 мес – 20%; 20% детей были на искусственном вскармливании с рождения. Раннее введение прикорма отмечалось в возрасте до 4 мес жизни у 30% детей. Степень БЭН определяли, используя стандарты Z-score и антропометрические показатели обследуемых детей (табл. 1), по классификации согласно Национальному руководству [16].

Биохимическое исследование включало определение концентрации в сыворотке крови триацилглицеринов (ТАГ), общего холестерина (ОХ), холестерина липопротеинов высокой (ХС-ЛПВП), низкой (ХС-ЛПНП) и очень низкой плотности (ХС-ЛПОНП) на биохимическом анализаторе Cobas Integra 400 plus (Roche Diagnostics, Швейцария). Кровь брали в ранние утренние часы, за 2 ч до приема пищи, без ночного кормления.

Статистическую обработку результатов исследований проводили с использованием программного пакета

Таблица 1. Распределение детей с белково-энергетической недостаточностью (БЭН) по полу, возрасту и степени тяжести

Table 1. Distribution of children with protein-energy malnutrition (PEM) by gender, age, and severity

Форма (степень тяжести) БЭН <i>Form (severity) of PEM</i>	Отношение массы тела к должствующей массе тела по росту (%) и Z-score <i>Ratio of body weight to predicted body weight for height and Z-score</i>	Возраст, мес <i>Age, months</i> <i>M±m</i>	Количество детей / <i>Number of children</i>			
			первое полугодие жизни <i>1st half a year of life</i>	второе полугодие жизни <i>2nd half of a year of life</i>	мальчики <i>boys</i>	девочки <i>girls</i>
0	92–98 +1Z...-1Z	6,1±3,2	17	13	18	12
I (легкая / <i>mild</i>)	81–90 -1,1Z...-2,0Z	6,9±2,3	28	20	26	22
II (средняя / <i>moderate</i>)	70–80 -2,1Z...-3Z	5,8±2,1	20	22	23	19
III (тяжелая / <i>severe</i>)	<70 <-3Z	5,4±3,1	10	7	11	6

IBM SPSS 21.0 (IBM, США), предварительную обработку данных осуществляли в программе Excel 2023. Для определения статистической значимости различий средних величин использовали *t*-критерий Стьюдента.

Результаты

Поскольку пол является немодифицируемым фактором риска атеросклероза, у детей с нарушением пищевого статуса показатели липидного спектра крови анализировали в зависимости от пола.

Как видно из табл. 2, развитие БЭН у мальчиков приводит к значительному повышению уровней как ХС-ЛПОНП (+45%; $p \leq 0,05$), так ХС-ЛПНП (+85%; $p = 0,0001$). Максимальные величины (5,53 ммоль/л) вышли за рамки референтных значений [16–18]. У девочек повышение уровня ХС-ЛПНП (+40%; $p \leq 0,05$) сочеталось со значительным снижением концентрации ХС-ЛПОНП (-56%; $p \leq 0,05$). В изученной нами литературе имеются данные,

что у мальчиков активность пропротеиновой конвертазы субтилизин/кексин 9-го типа (PCSK9), которая посттрансляционно способствует деградации рецептора ЛПНП (LDLR) в гепатоцитах и повышает уровень ХС-ЛПНП, снижалась с возрастом, а у девочек повышалась [19]. Обнаружено, что экспрессия генов LDLR, зависит от пола: интенсивнее протекает в гепатоцитах мужчин с более высоким уровнем мРНК, чем в гепатоцитах женщин [20].

Анализ данных в зависимости от возраста обследованных детей выявил особенности липидного спектра у детей с БЭН (табл. 3). У детей основной группы в возрасте 1–6 мес жизни средний уровень ОХ существенно не отличался от такового у детей из группы сравнения; при этом как концентрация ХС-ЛПОНП (+60%; $p \leq 0,05$), так и ХС-ЛПНП (+62%; $p \leq 0,05$) оказалась значительно выше. Максимальные уровни ОХ и ХС-ЛПНП достигали 5,7 и 5,8 ммоль/л соответственно. У детей в возрасте 7–11 мес жизни уровень ХС-ЛПНП возрастал (+30%; $p > 0,05$) при снижении содержания ХС-ЛПОНП (-60%; $p \leq 0,05$).

Таблица 2. Гендерные особенности липидограммы сыворотки крови детей с белково-энергетической недостаточностью

Table 2. Gender peculiarities of serum lipidogram of children with protein-energy malnutrition

Показатель <i>Index</i>	Мальчики / <i>Boys</i>				Девочки / <i>Girls</i>			
	группа сравнения <i>control group</i>		основная группа <i>main group</i>		группа сравнения <i>control group</i>		основная группа <i>main group</i>	
	<i>M±m</i>	min-max	<i>M±m</i>	min-max	<i>M±m</i>	min-max	<i>M±m</i>	min-max
ТАГ, ммоль/л <i>TAG, mmol/L</i>	1,03±0,05	0,36–2,29	0,97±0,11	0,46–1,40	0,79±0,16	0,46–1,41	0,99±0,06	0,66–1,04
ОХ, ммоль/л <i>TC, mmol/L</i>	3,44±0,16	1,93–4,51	3,29±0,11	2,06–5,61	3,60±0,22	2,77–4,82	3,21 ±0,21	2,11–4,87
ХС-ЛПВП, ммоль/л <i>HDL-C, mmol/L</i>	1,62±0,09	0,98–2,93	1,63±0,53	0,41–3,90	1,54±0,14	0,91–2,08	1,48±0,11	0,29–2,8x
ХС-ЛПОНП, ммоль/л <i>VLDL-C, mmol/L</i>	0,63±0,02	0,61–0,65	0,87±0,28*	0,46–2,28	1,15±0,56	0,46–2,28	0,33±0,03*	0,34–0,48
ХС-ЛПНП, ммоль/л <i>LDL-C, mmol/L</i>	1,69±0,15	1,13–4,22	3,06±0,31*	1,1–5,53	1,87±0,29	0,82–3,32	2,48±0,18*	1,20–4,71

Примечание. * – статистически значимое отличие ($p \leq 0,05$) от показателя детей из группы сравнения. Здесь и в табл. 3, 4: расшифровка аббревиатур дана в тексте.

Note. * – statistically significant difference ($p \leq 0,05$) from the indicator of children in the control group. Here and in tables 3, 4: the abbreviations are explained in the text.

Таблица 3. Показатели липидного обмена в сыворотке крови детей с белково-энергетической недостаточностью первого и второго полугодия жизни**Table 3.** Indicators of serum lipid metabolism in children with protein-energy malnutrition in the first and second half-years of life

Показатель Index	Первое полугодие жизни / 1 st half a year of life				Второе полугодие жизни / 2 nd half of a year of life			
	группа сравнения control group		основная группа main group		группа сравнения control group		основная группа main group	
	M±m	min-max	M±m	min-max	M±m	min-max	M±m	min-max
ТАГ, ммоль/л TAG, mmol/L	0,95±0,12	0,36–1,11	1,12 ±0,16	0,65–1,35	1,06±0,21	0,64–1,2	0,87±0,11	0,54–1,32
ОХ, ммоль/л TC, mmol/L	3,46±0,15	1,93–4,82	3,56±0,19	2,53–5,71	3,57±0,25	2,71–5,21	3,38±0,22	2,1–5,11
ХС-ЛПВП, ммоль/л HDL-C, mmol/L	1,56±0,08	0,91–2,62	1,48±0,15	0,35–3,21	1,68±0,21	1,12–2,23	1,56±0,15	0,61–2,33
ХС-ЛПОНП, ммоль/л VLDL-C, mmol/L	0,58±0,03	0,46–0,69	0,93±0,61*	0,48–2,92	0,98±0,31	0,61–2,2	0,39±0,03*	0,25–0,51
ХС-ЛПНП, ммоль/л LDL-C, mmol/L	1,74±0,16	0,82–4,21	2,74±0,22*	1,41–5,81	1,84±0,27	1,23–2,7	2,39±0,26	1,12–5,01

Примечание. * – статистически значимое отличие ($p \leq 0,05$) от показателя детей из группы сравнения.

Note. * – statistically significant difference ($p \leq 0.05$) from the indicator of children in the control group.

На следующем этапе был рассмотрен характер липидного профиля крови у детей с различной степенью тяжести БЭН. Из результатов, представленных в табл. 4, следует, что концентрация ТАГ снижена при БЭН I (-33%; $p=0,009$) и III степени (-36%; $p<0,001$), уровень ХС-ЛПОНП повышен при I степени (+38%; $p \leq 0,05$) и снижен при II–III степенях (-27% и -31%, $p \leq 0,05$ соответственно). Отмечается прогрессирующее с утяжелением выраженности БЭН повышение уровня ХС-ЛПНП (I степени +43%; $p=0,005$; II степени +63%; $p=0,006$; III степени +85%; $p=0,006$).

Фазность изменений показателей ТАГ по мере утяжеления БЭН отражает, на наш взгляд, сформулированную Е.В. Неудахиным и соавт. (2021) концепцию адаптивно-компенсаторных реакций у детей с недостаточной массой тела, согласно которой I степень БЭН характеризуется «напряженной адаптацией» (в частности, мобилизацией резервных ТАГ из депо и использование их в качестве главных энергетических субстратов); II степень – «относительной компенсацией»; III – декомпенсацией (с истощением резерва адаптации).

Повышение содержания как ХС-ЛПОНП, так и ХС-ЛПНП при I степени БЭН и снижение уровня ХС-ЛПОНП при нарастающем увеличении содержания ХС-ЛПНП при II–III степенях свидетельствует о тенденции к формированию дислипидопроteinемии атерогенного типа, которая при III степени БЭН приобретает устойчивый характер.

Обсуждение

Анализ характера дислипидопроteinемии у детей первого года жизни при острой форме БЭН показывает, что уровень ОХ и ХС-ЛПВП у всех категорий обследованных детей отличается стабильностью. В то же время данные ряда исследований, содержащих сведения об уровне ОХ у детей с нарушением пищевого статуса, противоречивы [14, 21].

Существенно меняется при формировании БЭН концентрация ХС-ЛПНП и ХС-ЛПОНП. У всех детей основной группы установлено значительное повышение

Таблица 4. Параметры липидного обмена в сыворотке крови детей в зависимости от степени тяжести белково-энергетической недостаточности (БЭН) (M±m)**Table 4.** Serum lipid metabolism parameters in children depending on the severity of protein-energy malnutrition (PEM) (M±m)

Показатель Index	Группа сравнения Control group	Степень тяжести БЭН / PEM severity		
		I	II	III
ТАГ, ммоль/л / TAG, mmol/L	0,97±0,11	0,65±0,02* -33%	0,80±0,04	0,62±0,08* -36%
ОХ, ммоль/л / TC, mmol/L	3,49±0,13	3,31±0,22	3,11±0,41	3,61±0,31
ХС-ЛПВП, ммоль/л / HDL-C, mmol/L	1,59±0,08	1,51±0,19	1,71±0,12	1,37±0,23
ХС-ЛПОНП, ммоль/л / VLDL-C, mmol/L	0,63±0,02	0,87±0,37* +38%	0,46±0,04* -27%	0,43±0,12* -31%
ХС-ЛПНП, ммоль/л / LDL-C, mmol/L	1,76±0,14	2,52±0,28* +43%	2,87±0,24* +63%	3,26±0,16* +85%

Примечание. * – статистически значимое отличие ($p \leq 0,05$) от показателя детей из группы сравнения.

Note. * – statistically significant difference ($p \leq 0.05$) from the indicator of children in the control group.

уровня ХС-ЛПНП, оказывающих атерогенное действие. При этом выраженность данных изменений определяется прежде всего полом ребенка (+81%; $p \leq 0,05$ у мальчиков и +32%; $p \leq 0,05$ у девочек, см. табл. 2), достигая максимального значения у мальчиков (5,53 ммоль/л), и степенью тяжести БЭН (+63%; $p \leq 0,05$ при II степени; +85%; $p \leq 0,05$ при III степени, см. табл. 4). Данный показатель значительно выше у детей первого полугодия жизни (+57%, $p \leq 0,05$, табл. 3) при отсутствии существенных изменений у детей в возрасте 7–11 мес.

Неоднозначны изменения уровня ХС-ЛПОНП. У детей с I степенью тяжести БЭН, детей мужского пола, первого полугодия жизни данный показатель значительно повышен, при БЭН II–III степенях снижен.

Выявлены особенности липидограммы у детей в зависимости от гестационного возраста при рождении. Данные ряда авторов [8, 18, 22] показывают более высокие концентрации в сыворотке крови ОХ, ХС-ЛПНП у недоношенных детей (гестационный возраст 33–37 нед) по сравнению с доношенными. У недоношенных детей, родившихся на 28–33-й неделях гестации, уровень ОХ такой же, как у доношенных новорожденных. Это связывается с тем, что в период максимальной скорости роста между 33–37-й неделями гестации потребность клеток в ХС-ЛПОНП и ХС-ЛПНП для синтеза мембран и гормонов увеличивается. Позднее, в период менее быстрого роста, после 37 нед гестации концентрация ОХ, ХС-ЛПОНП, ХС-ЛПНП падает в соответствие со снижением потребностей организма [18, 22]. И в целом в течение внутриутробного периода концентрация ОХ и липопротеинов в крови плода пропорциональна темпу нарастания его массы и миелинизации нервных волокон. Акцентируется наличие отрицательной корреляционной связи между гестационным возрастом и уровнем холестерина плода; при этом у недоношенных детей концентрация ОХ в сыворотке крови может быть выше, чем у доношенных [18].

Полученные нами ранее данные показывают [23], что у недоношенных детей при развитии у них БЭН происходит нарастание уровней как ХС-ЛПНП, так и ХС-ЛПОНП.

Результаты настоящего исследования свидетельствуют, что характер перестройки соотношений ХС-ЛПНП, ХС-ЛПОНП приводит к формированию дислипидотеинемии атерогенного типа в первую очередь у мальчиков и у детей с тяжелой формой БЭН.

Заложенные генетически протективные внегонадо-тропные эффекты андрогенов (низкая жировая масса, стимуляция выработки лептина) сочетаются одновременно с нежелательными факторами [24], что, очевидно, ярко реализуется при формировании недостаточности массы тела.

При этом развитие дислипидотеинемии по атерогенному типу при БЭН, по данным настоящего исследования, более вероятно в первое полугодие жизни, и этого не происходит у детей второго полугодия. Рядом исследований показано, что в норме со 2-го до 7-го месяца жизни происходит постепенное нарастание уровня ОХ в сыворотке крови, которое затем происходит медленнее до 9–11 мес,

когда он становится более близким к показателям взрослых; затем уровни ОХ и ХС-ЛПНП снижаются в пубертатный период, после завершения которого к 19–20 годам достигают значений взрослых [8, 25].

Исследования последних лет показывают, что модифицированные дикарбонильными соединениями ЛПНП обладают большей способностью проникать и накапливаться в стенках сосудов, чем интактные, вследствие активного захвата макрофагами посредством рецепторов-поглотителей, тем самым проявляя свойства атерогенности [26, 27].

Установлено, что химическая модификация апопротеина В-100 ЛПНП может возникать вследствие реакции дикарбонильных соединений (глиоксаль, метилглиоксаль) с аминогруппами концевых аминокислот, а также с SH-группами. Подобные модификации признаны необратимыми и сопровождаются изменениями структурно-функциональных свойств белков [28]. Образуются активные карбонильные соединения при карбонильном стрессе, что имеет место при атерогенезе [29]. Показано также, что модифицированные дикарбонильными соединениями ЛПНП вызывают экспрессию генов рецептора I окисленных ЛПНП и НАДФ-оксидазы клеток эндотелия сосудов, что формирует эндотелиальную дисфункцию [29]. В качестве главного пути образования метилглиоксала, гликирующая способность которого тысячекратно превышает таковую глюкозы и фруктозы, выделяют спонтанный неферментативный гидролитический распад фосфотриоз [диоксиацетонфосфата (ДОАФ) и глицеральдегид-3-фосфата].

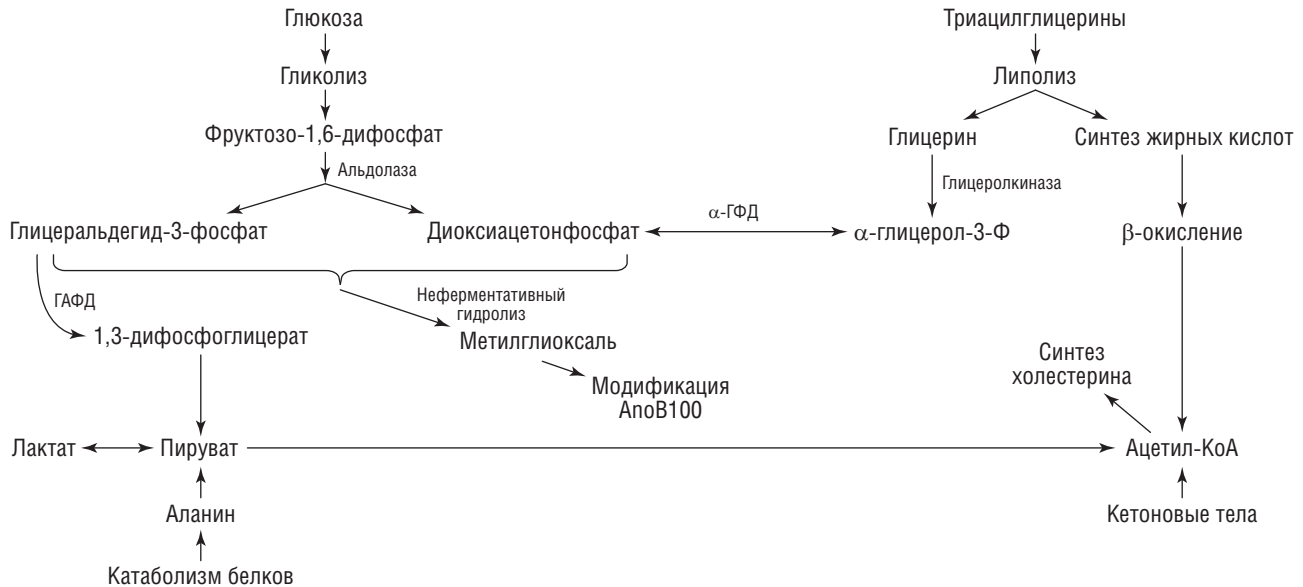
При энергетическом дефиците, быстро истощающем резервы гликогена, активируются процессы липолиза резервных ТАГ жировой ткани с образованием свободных жирных кислот, которые начинают выполнять роль главного энергетического субстрата альтернативно глюкозе (см. рисунок).

Одним из источников ДОАФ, помимо альдолазной реакции гликолиза, является α -глицерол-3-фосфат, обратимо превращающийся в ДОАФ под действием α -глицерофосфатдегидрогеназы (α -ГФДГ). В норме равновесие α -глицерофосфатдегидрогеназной реакции смещено в сторону образования ДОАФ.

Одним из маркеров БЭН является количество лимфоцитов [21]. Исследование α -ГФДГ в лимфоцитах выявило достоверное снижение активности данного фермента у детей первого года при всех степенях тяжести БЭН, включая I [14], а также у детей, родившихся преждевременно (22–27 нед) [30].

Установлено, что у лиц с морфологически верифицированным атеросклерозом (аутопсийный материал) отмечается значительное снижение активности α -ГФДГ при увеличении содержания α -глицерофосфата и ДОАФ как в стенке аорты, так и в крови [31]. Аналогичны изменения в α -глицерофосфатной системе и в крови пациентов с неосложненной формой ишемической болезни сердца [31].

Атерогенное действие α -глицерофосфата доказано экспериментально, и одной из моделей эксперимен-



Возможный механизм формирования дислипотеинемии атерогенного типа при белково-энергетической недостаточности

α -ГФДГ – α -глицерофосфатдегидрогеназа; ГАФД – глицеральдегидфосфатдегидрогеназа.

Possible mechanism of formation of atherogenic-type dyslipoproteinemia in protein-energy malnutrition

тального атеросклероза является глицерофосфатная [32]. В условиях экспериментального атеросклероза (скелетные мышцы кролика), а также на аутопсийном материале (скелетная мускулатура человека) установлено увеличение активности α -ГФДГ в обратной реакции, что отражает усиление восстановления ДОАФ в α -глицерофосфат; α -глицерофосфатдегидрогеназная реакция становится равновесной, при этом субстратное торможение (ДОАФ) активности α -ГФДГ практически не выявляется [31].

При атеросклерозе в скелетной мускулатуре и эритроцитах как экспериментальных животных, так и человека также обнаружено резкое снижение активности глицеральдегидфосфатдегидрогеназы (ГАФД), фермента, утилизирующего глицеральдегид-3-фосфат в реакции гликолитической оксидоредукции, что создает условия для еще большего накопления фосфотриоз. Как следует из вышеприведенных рассуждений, возрастание уровня фосфотриоз приводит к увеличению образования метилглиоксала с последующей модификацией белков. В работах В.И. Муронца и соавт. [33, 34] обнаружено ингибирование ГАФД путем гликирования как метилглиоксалем, так и ее собственным субстратом глицеральдегид-3-фосфатом. Это, несомненно, способствует утяжелению карбонильного стресса.

Вместе с тем отмечается, что карбонильный стресс является одним из патологических механизмов БЭН [35, 36]. Поэтому можно полагать, что при белково-энергетическом дефиците даже у детей раннего возраста количественное изменение ЛПНП сопровождается также их атерогенной модификацией с увеличением содержания холестерина в их составе.

Д. Баркер и его группа одними из первых установили взаимосвязь между массой тела при рождении и развитием патологии ССС во взрослом возрасте. Было показано также, что показатели ОХ, ХС-ЛПНП, апопротеина В были более высокими у взрослых 50–53 лет, которые имели малую массу тела при рождении [37]. Дальнейшие исследования все больше и больше подтверждают эти положения. Морфологически установлено, что утолщение комплекса интима–медиа коронарных артерий начинается уже во внутриутробный период и прогрессирует в детском и подростковом возрасте, причем у новорожденных с низкой массой тела (с гестационным возрастом 23–42 нед), умерших от причин, не связанных с ССС, толщина комплекса интима–медиа коронарных сосудов имела сильную положительную корреляцию с гестационным возрастом [38]. Динамичное наблюдение в течение года доношенных детей грудного возраста с задержкой внутриутробного развития показывает высокую частоту поражения ССС, верифицированную инструментальными методами [15].

Была предложена гипотеза «фетального программирования» [39], согласно которой феномен трекинга относительно плазменных липопротеинов носит отсроченный характер с возможностью реализации на более поздних этапах онтогенеза, а достоверно чаще выявляется в возрастной группе 10–14 лет у мальчиков [10–13, 15, 38].

Таким образом, дети, перенесшие БЭН в возрасте до 6 мес (мальчики, недоношенные дети, дети, перенесшие БЭН, особенно в тяжелой форме), могут формировать группу риска по развитию атеросклероза на более поздних сроках развития, а белково-энергетический дефицит можно рассматривать как мощный

индуктор биосинтеза холестерина, что реализуется, по-видимому, за счет посттранскрипционной регуляции экспрессии генов, кодирующих холестерин-связывающие белки, гена 3-гидрокси-3-метилглутарил-CoA-редуктазы и рецептора ЛПНП [40]. Это обосновывает

рациональность целевого скрининга данной категории детей для предупреждения, своевременного выявления дислипидопроteinемии атерогенного типа и ее своевременной коррекции, когда патологические изменения могут носить еще обратимый характер.

Сведения об авторах

ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава России (Самара, Российская Федерация):

Кузнецова Ольга Юрьевна (Olga U. Kuznetsova) – кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры фундаментальной и клинической биохимии с лабораторной диагностикой

E-mail: o.yu.kuznecova@samsmu.ru

<https://orcid.org/0009-0006-5576-3074>

Горбачева Ирина Васильевна (Irina V. Gorbacheva) – кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры фундаментальной и клинической биохимии с лабораторной диагностикой

E-mail: i.v.gorbacheva@samsmu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8267-9250>

Гильмиярова Фрида Насыровна (Frida N. Gilmiyarova) – доктор медицинских наук, заслуженный деятель науки РФ, профессор, профессор кафедры фундаментальной и клинической биохимии с лабораторной диагностикой

E-mail: f.n.gilmiyarova@samsmu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5992-3609>

Литература

- Ежов М.В., Кухарчук В.В., Сергиенко И.В., Алиева А.С., Анциферов М.Б., Аншелес А.А. и др. Нарушения липидного обмена. Клинические рекомендации 2023 // Российский кардиологический журнал. 2023. Т. 28, № 5. С. 250–297. DOI: <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2023-5471>
- Бойцов С.А. Резервы снижения смертности от сердечно-сосудистых заболеваний // Терапевтический архив. 2023. Т. 95, № 12. С. 1052–1055. DOI: <https://doi.org/10.26442/00403660.2023.12.202500>
- Кардиология / под ред. И.Е. Чазовой. Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2024. 920 с. DOI: <https://doi.org/10.33029/9704-7883-7-CRD-2024-1-920> ISBN: 978-5-9704-7883-7
- Садыкова Д.И., Салахова К.Р., Галимова Л.Ф., Сластикова Е.С., Халиуллина Ч.Д. Семейная гиперхолестеринемия у детей. Современное состояние проблемы // Вопросы современной педиатрии. 2023. Т. 22, № 3. С. 231–240. DOI: <https://doi.org/10.15690/vsp.v22i3.2576>
- Чагина Е.А., Турмова Е.П., Буряя В.Ю. Патологические факторы риска развития атеросклероза // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2022. № 3-3 (66). С. 11–14. DOI: <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2022-3-3-11-14>
- Пшеничникова И.И., Ежов М.Е., Трунина И.И., Османов И.М., Мирошина А.В., Борзакова С.Н. и др. Критерии отнесения детей к группам риска по атеросклеротическим сердечно-сосудистым заболеваниям // Медицинский совет. 2025. Т. 19, № 11. С. 206–211. DOI: <https://doi.org/10.21518/ms2025-275>
- Кардиология: национальное руководство : краткое издание / Российское кардиологическое общество; под ред. Е.В. Шляхто. 2-е изд. Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2023. 815 с. ISBN: 978-5-9704-7537-9.
- Клиорин А.И. Атеросклероз в детском возрасте. Ленинград : Медицина, Ленингр. отд.-ние, 1981. 192 с.
- Юрьева Э.А., Сухоруков В.С., Воздвиженская Е.С., Новикова Н.Н. Атеросклероз: гипотезы и теории // Российский вестник перинатологии и педиатрии. 2014. № 3. С. 6–16.
- Prati F., Baccirè F., Budassi S. Present and future of coronary risk assessment // Eur. Heart J. Suppl. 2021. Vol. 23. P. E123–E127. DOI: <https://doi.org/10.1093/eurheartj/suab106>
- Gooty V.D., Sinaiko A.R., Ryder J., Dengel D.R., Jacobs D.R., Steinberger J. Association between carotid intima media thickness, age, and cardiovascular risk factors in children and adolescents // Metab. Syndr. Relat. Disord. 2018. Vol. 16. P. 122–126. DOI: <https://doi.org/10.1089/met.2017.0149>
- Guerri-Guttenberg R., Castilla R., Cao G., Azzato F., Ambrosio G., Milei J. Coronary intimal thickening begins in fetuses and progresses in pediatric population and adolescents to atherosclerosis // Angiology. 2020. Vol. 71, N 1. P. 62–69. DOI: <https://doi.org/10.1177/0003319719849784>
- Смирнова Н.Н., Куприенко Н.Б., Уразильдеева С.А., Ильинцев И.В., Ивашихина Т.М., Ключко Л.А. Липидный статус у детей и подростков Санкт-Петербурга // Атеросклероз и дислипидемии. 2023. № 2 (51). С. 23–30. DOI: <https://doi.org/10.34687/2219-8202.JAD.2023.02.0003>
- Неудахин Е.В., Притыко А.Г., Кожанова Т.В., Абрамов А.А., Морено И.Г. Патогенез атерогенных нарушений у детей. Обоснование стрессовой теории атеросклероза // Атеросклероз – дорога жизни от зачатия до старости. Москва : РадиоСофт, 2021. С. 37–58. ISBN: 978-5-93274-297-6.
- Деревцов В.В., Неудахин Е.В. Перинатальное программирование заболеваний в зрелом возрасте при различных типах задержки внутриутробного роста и развития (кардиальные аспекты) // Quantum Satis. 2023. Т. 6, № 1. С. 82–83.
- Педиатрия : национальное руководство : краткое издание / под ред. А.А. Баранова. Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2014. 762 с. ISBN: 978-5-9704-2787-3.
- Марина А.С., Наточин Ю.В. Анализ крови, мочи в клинической диагностике: справочник педиатра. Санкт-Петербург : СпецЛит, 2016. 159 с. ISBN: 978-5-299-00746-6.
- Кишкун А.А. Лабораторные исследования в неонатологии. Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2022. 592 с. ISBN: 978-5-9704-7154-8.
- Paquette M., Faubert S., Saint-Pierre N., Baass A., Bernard S. Sex differences in LDL-C response to PCSK9 inhibitors: a real world experience // J. Clin. Lipidol. 2023. Vol. 17, N 1. P. 142–149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jacl.2022.12.002> PMID: 36641299
- Seidemann L., Lippold C.P., Rohm C.M., Eckel J.C., Schicht G., Matz-Soja M. et al. Sex hormones differently regulate lipid metabolism genes in primary human hepatocytes // BMC Endocr. Disord. 2024. Vol. 24, N 1. P. 135. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12902-024-01663-9>
- Яковлева М.Н., Смирнова К.И., Лисица И.А., Мешков А.В., Новикова И.С. Лабораторные маркеры белково-энергетической недостаточности. Обзор литературы // Университетский терапевтический вестник. 2024. Т. 6, № 1. С. 79–89. DOI: <https://doi.org/10.56871/UTJ.2024.38.70.007>
- Вельтишев Ю.Е., Ермолаев М.В., Ананенко А.А., Князев Ю.А. Обмен веществ у детей. Москва : Медицина, 1983. 463 с.
- Горбачева И.В., Кузнецова О.Ю., Гильмиярова Ф.Н., Печкуров Д.В., Виноградова Л.Н. Характеристика метаболического статуса детей первого года жизни с белково-энергетической недостаточностью в зависимости от гестационного возраста при рождении // Клиническая лабораторная диагностика. 2020. Т. 65, № 7. С. 405–410. DOI: <https://doi.org/10.18821/0869-2084-2020-65-7-405-410>
- Mason K.A., Schoelwer M.J., Rogol A.D. Androgens during infancy, childhood, and adolescence: physiology and use in clinical practice // Endocr. Rev. 2020. Vol. 41, N 3. Article ID bnaa003. DOI: <https://doi.org/10.18821/0869-2084-2020-65-7-405-41010.1210>
- Esfarjani S.V., Zakerkash M. Dyslipidemia in youth: epidemiology, pathophysiology, screening, management, and treatment: a review

- of the literature // J. Family Med. Prim. Care. 2022. Vol. 11, N 12. P. 7519–7526. DOI: https://doi.org/10.4103/jfmpc.jfmpc_2374_21
26. Lankin V.Z., Tikhaze A.K., Konovalova G.G. Differences in structural changes and pathophysiological effects of low-density lipoprotein particles upon accumulation of acylhydroperoxy derivatives in their outer phospholipid monolayer or upon modification of apolipoprotein b-100 by natural dicarbonyls // Biochemistry (Moscow). 2023. Vol. 88, N 11. P. 1910–1919. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0006297923110196>
 27. Poznyak A.V., Kashirskikh D.A., Sukhorukov V.N., Kalmykov V., Omelchenko A.V., Orekhov A.N. Cholesterol transport dysfunction and its involvement in atherogenesis // Int. J. Mol. Sci. 2022. Vol. 23, N 3. P. 1332. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23031332>
 28. He Y., Zhou C., Huang M., Tang C., Liu X., Yue Y. et al. Glyoxalase system: a systematic review of its biological activity, related-diseases, screening methods and small molecule regulators // Biomed. Pharmacol. J. 2020. Vol. 131. Article ID 110663 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.110663>
 29. Lankin V.Z., Tikhaze A.K., Sharapov M.G., Konovalova G.G. The role of natural low molecular weight dicarbonyls in atherogenesis and diabetogenesis // Rev. Cardiovasc. Med. 2024. Vol. 25, N 8. P. 295. DOI: <https://doi.org/10.31083/j.rcm2508295>
 30. Архипова М.Ю., Захарова С.Ю. Оценка состояния здоровья глубоководноношенных детей // Российский вестник перинатологии и педиатрии. 2016. Т. 61, № 1. С. 32–36. DOI: <https://doi.org/10.21508/1027-4065-2016-61-1-32-36>
 31. Панченко Л.Ф., Гильмиярова Ф.Н., Радомская В.М. Этанол и атеросклероз. Москва: Медицина, 1987. 128 с.
 32. Сидоренков И.В., Гильмиярова Ф.Н., Радомская В.М. Биохимические предпосылки поражения сердца атеросклерозом в эксперименте // CORetVASA. 1977. Т. 4, № 5. С. 327–333.
 33. Muronetz V., Barinova K., Schmalhausen E. Glycation of glyceraldehyde3phosphate dehydrogenase in the presence of glucose and glyceraldehyde3phosphate // J. Int. Soc. Antioxid. 2017. Vol. 2. P. 1–4. DOI: https://doi.org/10.18143/JISANH_V3I2_1057
 34. Муронец В.И., Мельникова А.К., Баранова К.В., Шмальгаузен Е.В. Ингибиторы глицеральдегид-3-фосфатдегидрогеназы и неожиданные последствия снижения ее активности // Биохимия. 2019. Т. 84, № 11. С. 1578–1591. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0320972519110058>
 35. Горбачева И.В., Кузнецова О.Ю., Гильмиярова Ф.Н., Печкуров Д.В. Оценка степени тяжести белково-энергетической недостаточности у детей: пируват как биохимический индикатор дефицита мышечной массы // Вопросы практической педиатрии. 2023. Т. 18, № 4. С. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.20953/1817-7646-2023-4-20-26>
 36. Горбачева И.В., Кузнецова О.Ю., Гильмиярова Ф.Н., Гусьякова О.А., Печкуров Д.В. Биохимические нарушения при легкой степени белково-энергетической недостаточности у детей: гендерные особенности // Вопросы питания. 2024. Т. 93, № 4. С. 22–30. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-4-22-30>
 37. Barker D.J., Winter P.D., Osmond C., Margetts B., Simmonds S.J. Weight in infancy and death from ischaemic heart disease // Lancet. 1989. Vol. 2, N 8663. P. 577–580. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(89\)90710-1](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(89)90710-1)
 38. Briana D.D., Malamitsi-Puchner A. Coronary intimal thickening begins in fetuses: proof of concept for the ‘fetal origins of adult disease’ hypothesis // Angiology. 2020. Vol. 71, N 1. P. 89. DOI: <https://doi.org/10.1177/0003319719857384>
 39. Barker D. The midwife, the coincidence, and the hypothesis // BMJ. 2003. Vol. 327, N 7429. P. 1428–1430. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.327.7429.1428>
 40. Смирнова А.В., Сухоруков В.Н., Карагодин В.П., Орехов А.Н. Эпигенетические факторы в атерогенезе: микроРНК // Биомедицинская химия. 2016. Т. 62, № 2. С. 134–140. DOI: <https://doi.org/10.18097/PBMC20166202134>

References

1. Ezhov M.V., Kukharchuk V.V., Sergienko I.V., Alieva A.S., Antsiferov M.B., Ansheles A.A., et al. Disorders of lipid metabolism. Clinical Guidelines 2023. Rossiyskiy kardiologicheskiy zhurnal [Russian Journal of Cardiology]. 2023; 28 (5): 250–297. DOI: <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2023-5471> (in Russian)
2. Boytsov S.A. Ways for reducing mortality from cardiovascular diseases: a review. Terapevticheskiy arkhiv [Therapeutic Archive]. 2023; 95 (12): 1052–5. DOI: <https://doi.org/10.26442/00403660.2023.12.202500> (in Russian)
3. Cardiology. In: I.E. Chazova (ed.). Moscow: GEOTAR-Media, 2024: 920 p. DOI: <https://doi.org/10.33029/9704-7883-7-CRD-2024-1-920> ISBN: 978-5-9704-7883-7 (in Russian)
4. Sadykova D.I., Salakhova K.R., Galimova L.F., Slastnikova E.S., Khamliullina Ch.D. Familial hypercholesterolemia in children. The current state of the problem. Voprosy sovremennoy pediatrii [Problems of Modern Pediatrics]. 2023; 22 (3): 231–40. DOI: <https://doi.org/10.15690/vsp.v22i3.2576> (in Russian)
5. Chagina E.A., Turmova E.P., Buraya V.Yu. Pathophysiological risk factors for atherosclerosis. Mezhdunarodniy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk [International Journal of Humanities and Natural Sciences]. 2022; 3-3 (66): 11–4. DOI: <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2022-3-3-11-14> (in Russian)
6. Pshenichnikova I.I., Ezhov M.E., Trunina I.I., et al. Criteria for classifying children as at risk for atherosclerotic cardiovascular diseases. Meditsinskiy sovet [Medical Council]. 2025; 19 (11): 206–11. DOI: <https://doi.org/10.21518/ms2025-275> (in Russian)
7. Cardiology: national guidelines: short edition. In: Russian Cardiology Society; E.V. Shlyakhto (ed.). 2nd ed. Moscow: GEOTAR-Media, 2023: 815 p. ISBN: 978-5-9704-7537-9 (in Russian)
8. Klierin A.I. Atherosclerosis in childhood. Leningrad: Meditsina, 1981. 92 p. (in Russian)
9. Yur'eva E.A., Sukhorukov V.S., Vozdvizhenskaya E.S., Novikova N.N. Atherosclerosis: hypotheses and theories. Rossiyskiy vestnik perinatologii i pediatrii [Russian Bulletin of Perinatology and Pediatrics]. 2014; (3): 6–16. (in Russian)
10. Prati F., Baccirè F., Budassi S. Present and future of coronary risk assessment // Eur. Heart J. Suppl. 2021. Vol. 23. P. E123–E127. DOI: <https://doi.org/10.1093/eurheartj/uaab106>
11. Gooty V.D., Sinaiko A.R., Ryder J., Dengel D.R., Jacobs D.R., Steinberger J. Association between carotid intima media thickness, age, and cardiovascular risk factors in children and adolescents. Metab Syndr Relat Disord. 2018; 16: 122–6. DOI: <https://doi.org/10.1089/met.2017.0149>
12. Guerri-Guttenberg R., Castilla R., Cao G., Azzato F., Ambrosio G., Milei J. Coronary intimal thickening begins in fetuses and progresses in pediatric population and adolescents to atherosclerosis. Angiology. 2020; 71 (1): 62–9. DOI: <https://doi.org/10.1177/0003319719849784>
13. Smirnova N.N., Kuprienko N.B., Urazgil'deeva S.A., Il'inets I.V., Ivashikhina T.M., Klochko L.A. Lipid status in children and adolescents of Saint Petersburg. Ateroskleroz i dislipidemii [Atherosclerosis and Dyslipidemia]. 2023; 2 (51): 23–30. DOI: <https://doi.org/10.34687/2219-8202.JAD.2023.02.0003> (in Russian)
14. Neudakhin E.V., Prityko A.G., Kozhanova T.V., Abramov A.A., Moreno I.G. Pathogenesis of atherogenic disorders in children. A rationale for the stress theory of atherosclerosis. In: Atherosclerosis – the Road to Life from Conception to Old Age. Moscow: RadioSoft, 2021: 37–58. ISBN: 978-5-93274-297-6. (in Russian)
15. Derevtsov V.V., Neudakhin E.V. Perinatal programming of diseases in adulthood with various types of intrauterine growth retardation (cardiac aspects). Quantum Satis. 2023; 6 (1): 82–3. (in Russian)
16. Pediatrics: national guidelines: short edition. In: A.A. Baranov (ed.). Moscow: GEOTAR-Media, 2014: 762 p. ISBN: 978-5-9704-2787-3. (in Russian)
17. Marina A.S., Natochin Yu.V. Blood and urine analysis in clinical diagnostics: a pediatrician's handbook. Saint Petersburg: SpetsLit, 2016: 159 p. ISBN: 978-5-299-00746-6 (in Russian)
18. Kishkun A.A. Laboratory tests in neonatology. Moscow: GEOTAR-Media, 2022: 592 p. ISBN: 978-5-9704-7154-8. (in Russian)
19. Paquette M., Faubert S., Saint-Pierre N., Baass A., Bernard S. Sex differences in LDL-C response to PCSK9 inhibitors: a real world experience. J Clin Lipidol. 2023; 17 (1): 142–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jacl.2022.12.002> PMID: 36641299.
20. Seidemann L., Lippold C.P., Rohm C.M., Eckel J.C., Schicht G., Matz-Soja M., et al. Sex hormones differently regulate lipid metabolism genes in primary human hepatocytes. BMC Endocr Disord. 2024; 24 (1): 135. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12902-024-01663-9>
21. Yakovleva M.N., Smirnova K.I., Lisitsa I.A., Meshkov A.V., Novikova I.S. Laboratory markers of protein-energy malnutrition. Literature review. Universitetskiy terapevticheskiy vestnik [University Therapeutic Bulletin]. 2024; 6 (1): 79–89. DOI: <https://doi.org/10.56871/UTJ.2024.38.70.007> (in Russian)
22. Vel'tishchev Yu.E., Ermolaev M.V., Ananenko A.A., Knyazev Yu.A. Metabolism in children. Moscow: Meditsina, 1983: 463 p. (in Russian)
23. Gorbacheva I.V., Kuznetsova O.Yu., Gil'miyarova F.N., Pechkurov D.V., Vinogradova L.N. Characteristics of the metabolic status of first-year-old children with protein-energy malnutrition, depend-

- ing on their gestational age at birth. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika* [Clinical Laboratory Diagnostics]. 2020; 65 (7): 405–10. DOI: <https://doi.org/10.18821/0869-2084-2020-65-7-405-410> (in Russian)
24. Mason K.A., Schoelwer M.J., Rogol A.D. Androgens during infancy, childhood, and adolescence: physiology and use in clinical practice. *Endocr Rev.* 2020; 41 (3): bnaa003. DOI: <https://doi.org/10.18821/0869-2084-2020-65-7-405-41010.1210>
25. Esfarjani S.V., Zakerkish M. Dyslipidemia in youth: epidemiology, pathophysiology, screening, management, and treatment: a review of the literature. *J Family Med Prim Care.* 2022; 11 (12): 7519–26. DOI: https://doi.org/10.4103/jfmpc.jfmpc_2374_21
26. Lankin V.Z., Tikhaze A.K., Konovalova G.G. Differences in structural changes and pathophysiological effects of low-density lipoprotein particles upon accumulation of acylhydroperoxy derivatives in their outer phospholipid monolayer or upon modification of apoprotein b-100 by natural dicarbonyls. *Biochemistry (Moscow).* 2023; 88 (11): 1910–9. DOI: <https://doi.org/10.1134/S000629723110196>
27. Poznyak A.V., Kashirskikh D.A., Sukhorukov V.N., Kalmykov V., Omelchenko A.V., Orekhov A.N. Cholesterol transport dysfunction and its involvement in atherogenesis. *Int J Mol Sci.* 2022; 23 (3): 1332. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23031332>
28. He Y., Zhou C., Huang M., Tang C., Liu X., Yue Y., et al. Glyoxalase system: a systematic review of its biological activity, related-diseases, screening methods and small molecule regulators. *Biomed Pharmacol J.* 2020; 131: 110663 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.110663>
29. Lankin V.Z., Tikhaze A.K., Sharapov M.G., Konovalova G.G. The role of natural low molecular weight dicarbonyls in atherogenesis and diabetogenesis. *Rev Cardiovasc Med.* 2024; 25 (8): 295. DOI: <https://doi.org/10.31083/j.rcm2508295>
30. Arkhipova M.Yu., Zakharova S.Yu. Assessment of the health status of very premature infants. *Rossiyskiy vestnik perinatologii i pediatrii* [Russian Bulletin of Perinatology and Pediatrics]. 2016; 61 (1): 32–6. DOI: <https://doi.org/10.21508/1027-4065-2016-61-1-32-36> (in Russian)
31. Panchenko L.F., Gil'miyarova F.N., Radomskaya V.M. Ethanol and atherosclerosis. *Moscow: Meditsina*, 1987: 128 p. (in Russian)
32. Sidorenkov I.V., Gil'miyarova F.N., Radomskaya V.M. Biochemical prerequisites for heart damage by atherosclerosis in an experiment. *CORetVASA.* 1977; 4 (5): 327–33. (in Russian)
33. Muronetz V., Barinova K., Schmalhausen E. Glycation of glyceraldehyde3phosphate dehydrogenase in the presence of glucose and glyceraldehyde3phosphate. *J Int Soc Antioxid.* 2017; 2: 1–4. DOI: https://doi.org/10.18143/JISANH_V3I2_1057
34. Muronets V.I., Mel'nikova A.K., Barinova K.V., Shmal'gauzen E.V. Inhibitors of glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase and unexpected consequences of decreased activity. *Biokhimiya* [Biochemistry]. 2019; 84 (11): 1578–91. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0320972519110058> (in Russian)
35. Gorbacheva I.V., Kuznetsova O.Yu., Gil'miyarova F.N., Pechkurov D.V. Assessment of the severity of protein-energy malnutrition in children: pyruvate as a biochemical indicator of muscle mass deficiency. *Voprosy prakticheskoy pediatrii* [Problems of Practical Pediatrics]. 2023; 18 (4): 20–6. DOI: <https://doi.org/10.20953/1817-7646-2023-4-20-26> (in Russian)
36. Gorbacheva I.V., Kuznetsova O.Yu., Gil'miyarova F.N., Guskova O.A., Pechkurov D.V. Biochemical disorders in children with mild protein-energy malnutrition: gender-specific features. *Voprosy pitaniia* [Problems of Nutrition]. 2024; 93 (4): 22–30. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-4-22-30> (in Russian)
37. Barker D.J., Winter P.D., Osmond C., Margetts B., Simmonds S.J. Weight in infancy and death from ischaemic heart disease. *Lancet.* 1989; 2 (8663): 577–80. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(89\)90710-1](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(89)90710-1)
38. Briana D.D., Malamitsi-Puchner A. Coronary intimal thickening begins in fetuses: proof of concept for the «fetal origins of adult disease» hypothesis. *Angiology.* 2020; 71 (1): 89. DOI: <https://doi.org/10.1177/0003319719857384>
39. Barker D. The midwife, the coincidence, and the hypothesis. *BMJ.* 2003; 327 (7429): 1428–30. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.327.7429.1428>
40. Smirnova A.V., Sukhorukov V.N., Karagodin V.P., Orekhov A.N. Epigenetic factors in atherogenesis: microRNAs. *Biomeditsinskaya khimiya* [Biomedical Chemistry]. 2016; 62 (2): 134–40. DOI: <https://doi.org/10.18097/PBMC20166202134> (in Russian)

Для корреспонденции

Конеv Антон Дмитриевич – лаборант-исследователь лаборатории энзимологии питания ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»
Адрес: 109240, Российская Федерация, г. Москва,
Устьинский проезд, д. 2/14
Телефон: (495) 698-53-65
E-mail: konevtonyion@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0976-1415>

Конеv А.Д.¹, Седова И.Б.¹, Тутельян В.А.^{1, 2}

Альтернариатоксины как угроза здоровью: цитотоксические эффекты

Alternaria toxins as a health threat: cytotoxic effects

Konev A.D.¹, Sedova I.B.¹, Tutelyan V.A.^{1, 2}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, 109240, г. Москва, Российская Федерация

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), 119991, г. Москва, Российская Федерация

¹ Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, 109240, Moscow, Russian Federation

² I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), 119991, Moscow, Russian Federation

Альтернариатоксины – потенциально опасные для здоровья человека метаболиты плесневых грибов рода Alternaria, которые с появлением современных аналитических методов стали обнаруживать как в продовольственном сырье, так и в продуктах его переработки. Несмотря на возможные риски для здоровья населения, содержание токсинов Alternaria не регулируется в пищевой продукции, а многие из них остаются полностью неизученными.

Цель работы – проанализировать и обобщить результаты исследований, посвященных изучению цитотоксических эффектов альтернариатоксинов в экспериментах *in vitro* и *in vivo*.

Материал и методы. Поиск источников проводили по базам данных рецензируемой научной литературы PubMed, Google Scholar и КиберЛенинка без ограничений по году публикации по ключевым словам: *Alternaria*, *Alternaria* toxins, cytotoxicity, oxidative stress, toxicity, альтернариатоксины, цитотоксичность, окислительный стресс, токсичность.

Финансирование. Работа проведена в рамках выполнения государственного задания (тема № FGMF-2023-0006).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Вклад авторов. Дизайн исследования – Тутельян В.А.; поиск и анализ данных литературы, подготовка рукописи – Конеv А.Д., Седова И.Б.; редактирование – Тутельян В.А.; утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи – все авторы.

Для цитирования: Конеv А.Д., Седова И.Б., Тутельян В.А. Альтернариатоксины как угроза здоровью: цитотоксичность и окислительный стресс // Вопросы питания. 2025. Т. 94, № 6. С. 47–57. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-47-57>

Статья поступила в редакцию 28.07.2025. **Принята в печать** 10.11.2025.

Funding. The study was carried out at the expense of the subsidy for the fulfillment of the state task (FGMF-2023-0006).

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

Contribution. Research design – Tutelyan V.A.; literature search and analysis, manuscript writing – Konev A.D., Sedova I.B.; editing – Tutelyan V.A.; approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article – all authors.

For citation: Konev A.D., Sedova I.B., Tutelyan V.A. Alternaria toxins as a health threat: cytotoxic effects. *Voprosy pitaniia* [Problems of Nutrition]. 2025; 94 (6): 47–57. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-47-57> (in Russian)

Received 28.07.2025. **Accepted** 10.11.2025

Результаты. Проведены анализы и обобщение данных исследований цитотоксичности, включая повреждение ДНК и окислительный стресс (ОС), и результатов токсикологических экспериментов для следующих метаболитов грибов рода *Alternaria*: альтернариол (АОН), его монометиловый эфир (АМЕ), альтенуен (ALT), tenuazonовая кислота (TeA), тентоксин (TEN), альтертоксин I (ATX I), альтертоксин II (ATX II), альтертоксин III (ATX III), альтерперилеиол (ALTP), стемфилтоксин III (STTX III). Дозозависимая гибель здоровых и раковых клеток во многих исследованиях доказывает высокую токсикологическую опасность АОН. Снижение жизнеспособности части клеточных линий говорит о негативном воздействии АМЕ на некоторые ткани и органы. Результаты изучения токсичности ALT противоречивы, а TEN не оказывал цитотоксического эффекта при концентрациях ниже 100 мкМ. TeA в диапазоне от 109 до 187,6 мкМ вызывала 50% гибель раковых клеток. Если данные по ATX I противоречивы, то перилеиолы ATX II, ATX III, STTX III и ALTP показывали высокую цитотоксичность, причиной этого считают наличие эпоксидных групп. Смеси альтернариатоксинов проявляют аддитивные и синергические эффекты, представляют опасность и требуют подробного изучения в новых комбинаторных исследованиях. Поскольку АОН и АМЕ вызывали повреждения ДНК, необходимы дополнительные данные по их генотоксичности *in vivo* с акцентом на пищеварительный тракт. АОН, АМЕ и TeA способны индуцировать ОС, на что указывают проведенные исследования *in vitro* и *in vivo*. В настоящее время отсутствуют публикации, оценивающие влияние ALT, TEN и перилеиолов на показатели ОС. Сильная цитотоксичность перилеиолов *in vitro* также требует внимания исследователей.

Заключение. В данный момент достаточный объем информации для подтверждения угрозы здоровью имеется только для АОН, а для остальных токсинов грибов *Alternaria* требуются дополнительные данные.

Ключевые слова: *Alternaria*; альтернариатоксины; цитотоксичность; окислительный стресс; токсичность

Alternaria toxins are metabolites of fungi of the genus Alternaria that pose a potential health hazard. With the advent of modern analytical methods, they have begun to be detected in both raw materials and processed food. Despite the potential health risks, the content of Alternaria toxins in food is not regulated, and a lot of them remain completely unstudied.

The aim of this review was to analyze and summarize the results of studies devoted to the investigation of the cytotoxic effects of *Alternaria* toxins via *in vitro* and *in vivo* experiments.

Material and methods. The search for sources was conducted in databases of peer-reviewed scientific literature PubMed, Google Scholar and Cyberleninka without restrictions on year of publication by key words: *Alternaria*, *Alternaria* toxins, cytotoxicity, oxidative stress, toxicity.

Results. The summarizing and analysis of data from studies on cytotoxicity, including DNA damage and oxidative stress (OS), and the results of toxicological experiments for the following metabolites of fungi of the genus *Alternaria* were carried out: alternariol (AOH), its monomethyl ether (AME), altenuene (ALT), tenuazonic acid (TeA), tentoxin (TEN), altertoxin I (ATX I), altertoxin II (ATX II), altertoxin III (ATX III), alterperinol (ALTP), stemphytoxin III (STTX III). Dose-dependent death of healthy and cancer cells in many studies proves the high toxicological hazard of AOH. A part of the cell lines viability reduction has a negative impact on some tissues and organs to AME. Toxicity of ALT was contradictory, and TEN did not produce cytotoxic effects at concentrations below 100 μ M. TeA in the concentration range of 109 to 187.6 μ M caused 50% cancer cells death. The data for ATX I are contradictory, while ATX II, ATX III, STTX III and ALTP perylenequinones showed high cytotoxicity, due to the presence of epoxy groups. Mixtures of *Alternaria* toxins exhibit additive and synergistic effects, pose a hazard and require further investigation in new combinatorial studies. AOH and AME caused DNA damage, so additional data of genotoxicity *in vivo* are needed, focusing on the gastrointestinal tract. AOH, AME, and TeA are able to induce OS. There are no publications currently available to assess impact of ALT, TEN, and perylenequinones on OS parameters. Particular attention should be paid to perylenequinones due to their strong *in vitro* cytotoxicity.

Conclusion. Currently, sufficient data is available to confirm a health hazard only for AOH, and further data are needed for the remaining *Alternaria* fungal toxins.

Keywords: *Alternaria*; *Alternaria* toxins; cytotoxicity; oxidative stress; toxicity

Токсичные метаболиты плесневых грибов рода *Alternaria* представляют глобальную проблему для продовольственной безопасности, контаминируя сельскохозяйственную продукцию [1].

Грибы рода *Alternaria* являются широко распространенными возбудителями болезней растений и сапрофитами, способными расти в различных условиях, а также на многих сельскохозяйственных культурах [2]. Основными видами грибов этого рода, загрязняющими сельскохозяйственную продукцию, являются *A. alternata*, *A. brassicae*, *A. brassicicola*, *A. solani*, *A. tenuissima*, *A. radicina*, *A. longipes*, *A. helianthi*, *A. dauci*, *A. citri*, *A. cucumerina*, *A. japonica*, *A. arborescens*, *A. dumosa*, *A. interrupta* [3]. При благоприятных для роста плесени условиях (высокая температура и влажность) токсинообразование усиливается. Климатические изменения способны повлиять на условия роста плесневых грибов и географию их распространения, что может привести к увеличению токсического воздействия микотоксинов на человека [4].

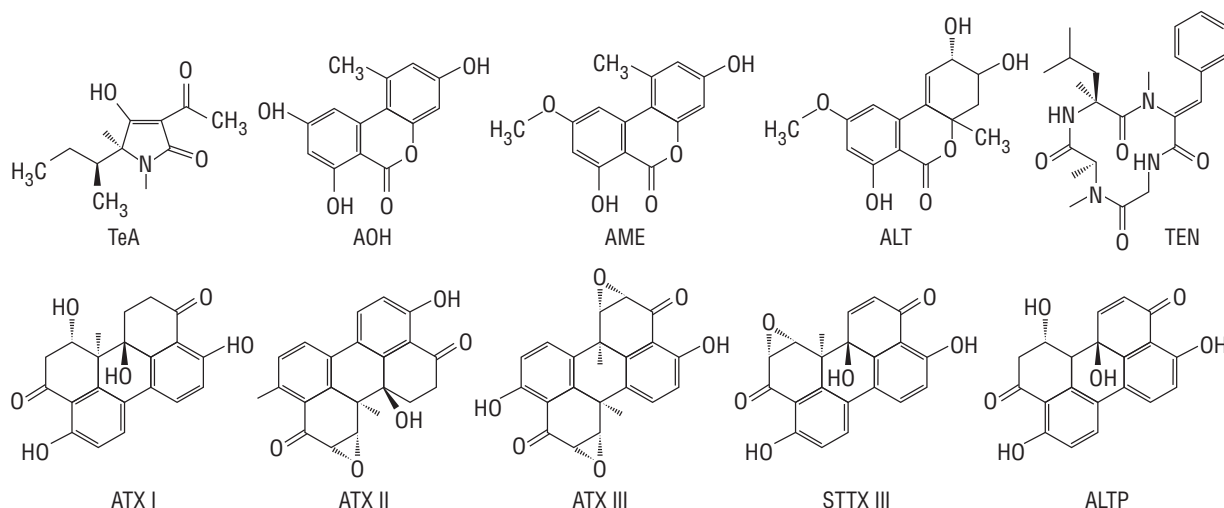
Будучи термостабильными соединениями, альтернариатоксины не разрушаются при переработке (кипячении, обжаривании и др.) или ферментации и переходят из сырья в готовые пищевые продукты [5]. Риски попадания опасных метаболитов грибов рода *Alternaria* в организм человека связаны с потреблением пищевых продуктов на основе пшеницы, соевых бобов, томатов, яблок, апельсинов, капусты, рапса, моркови, винограда, орехов, специй, овощных соков, растительных масел и семян подсолнечника [6]. По нашим данным, альтернариатоксины были выявлены в продуктах переработки томатов, специях (паприка и перец чили) и во фруктовых соках на основе яблок и винограда [7–9]. Наибольший риск для здоровья населения связан с их хроническим поступлением при потреблении пищевых продуктов. Присутствие микотоксинов в пищевой цепи вызывает серьезную озабоченность из-за их токсических эффектов даже при низких уровнях загрязнения. Необходимо отметить, что воздействие токсинов *Alternaria* пред-

ставляет опасность для здоровья детей, например при использовании неосветленных продуктов переработки яблок в детском питании [10].

Многочисленными исследованиями доказано совместное присутствие разных микотоксинов *Alternaria* в пище [11], поэтому требуется изучение их одновременного воздействия. В исследовании S. Hickert и соавт. [12] обнаружено, что среди томатных продуктов ($n=34$), фруктовых соков ($n=23$), хлебобулочных изделий ($n=9$), растительных масел ($n=19$) и семян подсолнечника ($n=11$), в сумме более 90% всех проанализированных образцов были загрязнены одним или несколькими альтернариатоксинами, причем наиболее распространенными являлись альтернариол (АОН) (60% образцов), его монометилловый эфир (АМЕ) (68% образцов) и тенуазоновая кислота (ТеА) (67% образцов). По результатам наших исследований комбинированное загрязнение альтернариатоксинами было обнаружено в 65% образцов паприки [ТеА и тентоксин (ТЕН)]; однократно ТеА, АОН, АМЕ и ТЕН], в 47% продуктов переработки томатов, включая 91% образцов томатной пасты [ТеА и альтенуен (АЛТ), реже с АОН и АМЕ], и в 16% фруктовых соков на основе яблок и винограда (ТеА и АОН, несколько с АЛТ и ТЕН) [7–9].

За последние десятилетия исследователями были описаны несколько сотен метаболитов грибов рода *Alternaria* с различной химической структурой (фенолы, терпеноиды, хиноны, стероиды, пираноны, азотсодержащие метаболиты и др.) [13, 14], и более 70 этих соединений потенциально опасны для здоровья людей [4]. Исследования альтернариатоксинов (см. рисунок) были сосредоточены на следующих классах соединений [14]:

- дибензо- α -пираноны: АЛТ, АОН, АМЕ;
- производные тетрамовой кислоты: ТеА;
- циклические тетрапептиды: ТЕН;
- периленихиноны: альтертоксин I, II, III (АТХ I, II, III), альтерпериленол (АЛТР), алтейхин (АЛТХ), стемфилтоксин III (СТТХ III).



Структурные формулы альтернариатоксинов

Structural formulas of *Alternaria* toxins

Были получены данные о загрязненности пищевых продуктов этими соединениями [10–12], но цитотоксичность альтернариатоксинов изучена недостаточно. В связи с этим **целью** исследования было проанализировать и обобщить результаты исследований, посвященных изучению цитотоксических эффектов альтернариатоксинов в экспериментах *in vitro* и *in vivo*.

Материал и методы

Поиск источников проводили по базам данных рецензируемой научной литературы PubMed, Google Scholar и КиберЛенинка без ограничений по году публикации по ключевым словам: *Alternaria*, *Alternaria toxins*, cytotoxicity, oxidative stress, toxicity, альтернариатоксины, цитотоксичность, окислительный стресс, токсичность.

Альтернариатоксины: цитотоксические эффекты *in vitro*

Попадая в организм с пищей, альтернариатоксины могут оказывать различные виды цитотоксических воздействий. Характерным признаком цитотоксичности

является окислительный стресс (ОС) – угнетение системы антиоксидантной защиты и избыточное образование активных форм кислорода (АФК), что приводит к окислению ДНК, жиров и белков с образованием характерных метаболитов – маркеров, например, малонового диальдегида (МДА) [15]. Доказано, что эти процессы являются частью механизма действия многих микотоксинов, поэтому изучение маркеров ОС нередко сопровождает многие токсикологические исследования метаболитов грибов *Alternaria*. Кроме того, при оценке вреда необходимо учитывать и другие механизмы цитотоксического воздействия – повреждение ДНК, апоптоз и др.

Желудочно-кишечный тракт – это важнейший барьер для пищевых ксенобиотиков и основная область всасывания пищевых веществ, поэтому культуры клеток желудочно-кишечного тракта (большей частью раковых) наиболее часто используют в экспериментах *in vitro* для исследований токсичности метаболитов *Alternaria*. Влияние этих токсинов также было изучено на линиях клеток легких, кожи и других органов. Данные литературы о цитотоксичности для АОН, АМЕ, ТеА, ТЕН, АЛТР, АЛТ, АТХ I, АТХ II, АТХ III, STTX III, полученные на клеточных линиях, суммированы в таблице.

Цитотоксичность альтернариатоксинов в экспериментах *in vitro*

Alternaria toxin cytotoxicity in vitro

Линия клеток <i>Cell line</i>	Концентрация; время воздействия <i>Concentration; time of exposure</i>	Результат воздействия <i>Results of the impact</i>	Источник литературы <i>Reference</i>
Альтернариол (АОН) / <i>Alternariol</i> (АОН)			
Сасо-2 (колоректальная аденокарцинома)	3,125–100 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток при 25–100 мкМ	[16]
НСТ116 (карцинома толстой кишки)	10–200 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток (с 10 мкМ), IC ₅₀ =65 мкМ активация митохондриального пути апоптоза (при 50 мкМ)	[17]
HT29 (аденокарцинома толстой кишки)	25–50 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток (с 25 мкМ)	[18]
Клетки Ишикавы (аденокарцинома эндометрия)	>5 мкМ; 48 ч	Снижение жизнеспособности клеток, гибель клеток	[19]
HeLa (карцинома шейки матки)	0–250 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток и уровня аденозинтрифосфата, IC ₅₀ =33,6 мкМ	[20]
RGA (клетки молочной железы)	5–10 мкг/мл; 48 ч	Снижение жизнеспособности 75% линий клеток	[21]
184A1 (эпителий молочной железы)	0,001–100 мкМ; 24 и 48 ч	Снижение жизнеспособности клеток, IC ₅₀ =23,97 мкМ, ОС, окисление ДНК, активация Nrf2	[22]
PNT1A (эпителий простаты)	10 мкМ; 24 и 48 ч 0,1–10 мкМ; 24 ч	Снижение на 40% жизнеспособности клеток эпителия, остановка клеточного цикла на фазе G2/M 10 мкМ – окислительный стресс, окисление ДНК, модуляция Nrf2; 0,1 мкМ – только окислительный стресс	[23]
RAW264.7 (макрофаги мышей)	15–30 мкМ – 24 ч; 60 мкМ – 48 ч	Снижение жизнеспособности клеток, некроз при 60 мкМ. Увеличение уровня АФК, окисление и разрывы цепей ДНК после 2 ч инкубации	[24]
Гранулезы (клетки яичников свиньи)	0,8–100 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток и ингибирование секреции стероидного гормона яичников Р ₄ (с 6,4 мкМ)	[25]
HaCaT (кератиноциты кожи человека)	2,5–20 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток при 20 мкМ	[26]
Клетки Ишикавы (аденокарцинома эндометрия) V79 (фибробласты китайского хомячка)	5 и 10 мкМ; 24, 48, 72 ч	Снижение числа клеток более 50% при 10 мкМ	[27]
V79 (фибробласты китайского хомячка) LY5178Ytk +/- (MLC) (лимфома мыши)	0–30 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособных клеток при 30 мкМ – 35% (V79) и 69% (LY5178Ytk +/- MLC)	[28]
НерG2 (гепатоцеллюлярная карцинома) и др.	0,1–250 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток, IC ₅₀ =51,4 мкМ	[29]

Продолжение таблицы

Линия клеток <i>Cell line</i>	Концентрация; время воздействия <i>Concentration; time of exposure</i>	Результат воздействия <i>Results of the impact</i>	Источник литературы <i>Reference</i>
HT29 (аденокарцинома толстой кишки)	>25 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток, клеточного белка, уровня глутатиона	[30]
HT29 (аденокарцинома толстой кишки) KYSE510 (плоскоклеточная карцинома пищевода)	0,1–50 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток коррелировало с дозозависимым образованием АФК	[31]
Caco-2 (колоректальная аденокарцинома)	3,125–100 мкМ; 24, 48 и 72 ч	ОС, рост АФК (20%) и МДА (130–250%)	[32]
Caco-2 (колоректальная аденокарцинома)	15–60 мкМ; 24 ч	Снижение глутатиона (43%), активности глутатионпероксидазы (30%), глутатионредуктазы (23%), глутатион-S-трансферазы (30%)	[33]
Монометиловый эфир альтернариола (AME) / <i>Alternariol monomethyl ether (AME)</i>			
HT29 (аденокарцинома толстой кишки)	>25 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток, клеточного белка, уровня глутатиона	[30]
НерG2 (гепатоцеллюлярная карцинома)	0–100 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток с 10 мкМ	[34]
HCT116 (карцинома толстой кишки)	10–200 мкМ; 24 ч, 48 ч	Снижение жизнеспособности и гибель клеток с 10 мкМ, IC ₅₀ =120 мкМ; повреждение ДНК, p53-зависимая активация митохондриального пути апоптоза	[35]
A549 (аденокарцинома легких) PC3 (аденокарцинома простаты)	Не указано	Снижение жизнеспособности клеток, IC ₅₀ =2,69 мкМ (A549) и 0,64 мкМ (PC3)	[36]
HT29 (аденокарцинома толстой кишки) KYSE510 (плоскоклеточная карцинома пищевода)	0,1–50 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток коррелировало с дозозависимым образованием АФК	[31]
IPEC-1 (эпителий кишечника)	0,5–5 мкМ; 24 ч	Окислительное повреждение ДНК и белков, снижение активности каталазы и супероксиддисмутазы, ингибирование сигнального пути Akt/Nrf2/HO-1	[37]
Альтенуен (ALT) / <i>Altenuene (ALT)</i>			
HaCaT (кератиноциты кожи человека)	Ниже 80 мкМ; 24 ч	Не влиял на жизнеспособность клеток при концентрации ниже 80 мкМ	[26]
HCT116 (карцинома толстой кишки)	3–100 мкМ; 72 ч	Снижение жизнеспособности клеток, IC ₅₀ =3,13 мкМ	[38]
Альтертоксин I (ATX I) / <i>Altetoxin I (ATX I)</i>			
MCF7 (аденокарцинома молочной железы)	0,01–5 мкМ; 24 ч	Отсутствие значительной цитотоксичности	[39]
НерG2 (гепатоцеллюлярная карцинома)	35,5–283,8 мкМ; не указано	IC ₅₀ =96,5 мкМ	[36]
C3H/10T ^{1/2} (фибробласты мышей)	1–15 мкМ; 48 ч	15 мкМ: значительное снижение выживаемости клеток	[40]
Альтертоксин II (ATX-II) / <i>Altetoxin II (ATX II)</i>			
HT29 (аденокарцинома толстой кишки)	0,01–10 мкМ; 24 ч, 72 ч	Значительное снижение пролиферации клеток, дозозависимый эффект	[41]
HT29 (аденокарцинома толстой кишки)	0,1–25 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток, IC ₅₀ =16,5 мкМ	[29]
HCEC-1CT (эпителий толстой кишки)	0,1–25 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток, IC ₅₀ =6,9 мкМ	[29]
НерG2 (гепатоцеллюлярная карцинома)	0,1–25 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток, IC ₅₀ =7,3 мкМ	[29]
A549 (аденокарцинома легких) PC3 (аденокарцинома простаты)	Не указано	Снижение жизнеспособности клеток, IC ₅₀ =1,15 и 0,33 мкМ	[36]
Альтертоксин III (ATX III) / <i>Altetoxin III (ATX III)</i>			
C3H/10T ^{1/2} (фибробласты мышей)	0,06–0,3 мкМ; 24 ч	50% гибель клеток при 0,3 мкМ, IC ₅₀ =0,3 мкМ	[40]
Альтерперилленол (ALTP) / <i>Alterperyleneol (ALTP)</i>			
MCF7 (аденокарцинома молочной железы) НерG2 (гепатоцеллюлярная карцинома) и др.	Не указано	Снижение жизнеспособности клеток, IC ₅₀ =3,73–6,57 мкМ	[42]
A549 (аденокарцинома легких) HCT116 (карцинома толстой кишки) и др.	Не указано	Снижение жизнеспособности клеток, IC ₅₀ =2,4–3,1 мкМ	[43]
Стемфилтоксин III (STTX III) / <i>Stemphyllotoxin III (STTX III)</i>			
V79 (фибробласты легкого китайского хомячка)	0,1–0,75 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток при концентрациях >0,25 мкМ	[44]
Тенуазоновая кислота (TeA) / <i>Teanuazonic acid (TeA)</i>			
НерG2 (гепатоцеллюлярная карцинома)	0–100 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток при 100 мкМ	[34]
HeLa (карцинома шейки матки) НерG2 (гепатоцеллюлярная карцинома)	31,25–500 мкМ; 24 ч	Снижение жизнеспособности клеток, IC ₅₀ =109 мкМ (HeLa), IC ₅₀ =146 мкМ (НерG2)	[36]

Линия клеток <i>Cell line</i>	Концентрация; время воздействия <i>Concentration; time of exposure</i>	Результат воздействия <i>Results of the impact</i>	Источник литературы <i>Reference</i>
Caco-2 (колоректальная аденокарцинома)	0–254 мкМ; 48 ч	Дозозависимое снижение жизнеспособности клеток, IC ₅₀ =187,6 мкМ, рост АФК, снижение активности каталазы и уровня аденозинтрифосфата	[45]
Тентоксин (TEN) / Tentoxin (TEN)			
НерG2 (гепатоцеллюлярная карцинома) НераRG (гепатоциты)	0,01–100 мкМ; 24 ч	Отсутствие значимого цитотоксического эффекта	[34]

П р и м е ч а н и е. IC₅₀ – концентрация токсина, которая снижает количество жизнеспособных клеток на 50% по сравнению с контролем; AS – альтенуизол; Nrf2 – фактор 2, связанный с ядерным фактором эритроидов.

В большинстве исследований с клеточными линиями зафиксированы дозозависимые цитотоксические эффекты АОН, что указывает на его токсикологическую опасность. Часть исследований не показали цитотоксичность АМЕ, тогда как остальные выявили концентрацию токсина, которая снижает количество жизнеспособных раковых клеток на 50% по сравнению с контролем (IC₅₀) в нескольких клеточных линиях, что указывает на повышенную чувствительность некоторых органов (кишечник, легкие, простата) к этому токсину. Способность некоторых альтернативных токсинов вызывать гибель клеток часто связывают с негативным влиянием на ДНК. Так, АОН и АМЕ вызывали повреждения ДНК, поэтому для этих микотоксинов необходимы дополнительные исследования генотоксичности *in vivo*. Более того, эти альтернативные токсины способны оказывать влияние на баланс между процессами окисления и антиоксидантной защитой в организме, индуцируя ОС.

Данные по цитотоксичности ALT противоречивы, в кератиноцитах кожи не зафиксировано снижения жизнеспособности клеток при концентрациях до 80 мкМ, но для клеток карциномы толстой кишки получен низкий IC₅₀, равный 3,13 мкМ. TEN не проявлял значимого цитотоксического эффекта при концентрациях ниже 100 мкМ. Сведений о влиянии ALT и TEN на ДНК и показатели ОС не обнаружено.

В экспериментах *in vitro* было показано, что TeA вызывала 50% гибель раковых клеток при концентрации 109–187,6 мкМ, а также ОС, приводя к росту содержания АФК и снижению активности ферментов антиоксидантной защиты.

Каждый изученный периленихин (ATX-I, ATX-II, ATX-III, ALTP и STTX-III) демонстрировал высокий генотоксический и мутагенный потенциал *in vitro* при отсутствии данных о влиянии на ОС. ALTP в низких концентрациях снижал жизнеспособность многих линий клеток (IC₅₀=2,6–6,57 мкМ). Для ATX I получены противоречивые данные. Доказана высокая цитотоксичность ATX II, ATX III и STTX III (0,33, 0,3 и 0,25 мкМ соответственно), что связывают с наличием эпоксидных групп.

Таким образом, исследования на клеточных линиях показали, что АОН, АМЕ, TeA и периленихины обладают цитотоксическими эффектами, поэтому для этих микотоксинов необходимы исследования *in vivo* с особым вниманием к желудочно-кишечному тракту.

Аддитивная и синергическая цитотоксичность *in vitro*

Поскольку обычно пищевые продукты контаминированы не одним, а несколькими микотоксинами, необходимо изучать их комбинированные эффекты, для чего были проведены исследования токсических эффектов смесей альтернативных токсинов.

В исследовании с использованием метода проточной цитометрии комбинации АОН : АМЕ (1:1), АМЕ : TeA (1:3) и АОН, АМЕ и TeA (1:1:3) после воздействия в течение 24–48 ч увеличивали цитотоксичность по сравнению с отдельными соединениями для клеток Caco-2 [46].

При изучении влияния двойных смесей АОН и АМЕ (1:1); АОН и TeA (1:2); АМЕ и TeA (1:2) и тройной смеси АОН, АМЕ и TeA (1:1:2) на эпителиальные клетки желудка человека GES-1 с помощью набора ССК-8 (анализ жизнеспособности клеток путем измерения активности митохондриальной дегидрогеназы) во всех случаях были выявлены синергические токсические эффекты, а также обнаружен рост количества апоптотических клеток, выявляемых с помощью набора Annexin V-FITC/PI Apoptosis Kit [6].

Совместное воздействие АОН и АМЕ (1:1, 25 мкМ) приводило к снижению жизнеспособности линии клеток рака кишечника HCT116 и большей токсичности по сравнению с индивидуальным воздействием после 24 ч инкубации (анализ с диацетатом флуоресцеина). Результаты показали, что АОН и АМЕ (в концентрации 25 мкМ) по отдельности могут индуцировать апоптоз, а их сочетание дает аддитивный эффект [47].

При работе со смесями ATX-II и АОН (1:10 и 1:1) в анализе WST-1 после 24-часовой обработки были выявлены аддитивные эффекты цитотоксичности для линий клеток НерG2, HT29 и HCEC-1CT. ATX II был более цитотоксичным, чем АОН, во всех 3 клеточных моделях. Также обнаружена регуляция некоторых микроРНК под воздействием АОН, ATX II и их бинарной смеси [29].

Известно о комбинированном воздействии токсинов *Alternaria* и других микотоксинов, как пример – совместное введение АОН и дезоксиниваленола в соотношении 10:1 после 48 ч привело к снижению жизнеспособности клеток (NR-тест, с использованием нейтрального красного C₁₅H₁₇CIN₄) и усилению экспрессии белка плотных контактов ZO-1 (метод иммунофлуоресцентного окрашивания), что влияло на проницаемость желудочно-кишечного барьера в дифференцированных клетках Caco-2 [48].

Из проанализированных данных можно сделать вывод, что смеси альтернариатоксинов проявляют аддитивные и синергические токсические эффекты, представляют опасность и требуют продолжения исследований, изучающих их совместное воздействие.

Альтернариатоксины: исследования *in vivo*

К настоящему времени известно о нескольких токсикологических исследованиях альтернариатоксинов *in vivo*.

Субхроническое (8 нед) внутрибрюшинное и пероральное введение TeA в дозе 475 мкг на 1 кг массы тела самцам аутбредных мышей-альбиносов (Swiss Webster) приводило к повышению уровня МДА в печени, легких, желудке, селезенке, тестикулах; снижению активности ферментов: каталазы в печени, легких, желудке, мозге, селезенке, почках, тестикулах и супероксиддисмутазы в печени, легких, мозге и тестикулах [49].

Последствиями острого воздействия смеси альтернариатоксинов за счет однократного интраназального введения 50 мкг экстракта *Alternaria alternata* в 40 мкл фосфатно-солевого буфера трансгенным мышам линий C57BL/6 J и CD11c-DTR были рост уровня АФК, повышение поглощения глюкозы и усиление провоспалительных реакций в антигенпрезентирующих клетках легких CD11c+ [50].

Результаты нашего исследования показали, что чистая TeA (CS-BX-00058, Clearsynth, Индия) в дозе 30 мг на 1 кг массы тела и экстракт из томатной пасты с содержанием TeA, АОН и АМЕ соответственно в дозе 30, 0,28 и 0,9 мг на 1 кг массы тела, полученный после культивации с *Alternaria alternata*, при однократном внутрижелудочном введении крысам Wistar вызывали рост уровня МДА в печени (в 1,6 и 2,1 раза соответственно), что свидетельствует об интенсификации процессов перекисного окисления липидов [51]. Также, согласно полученным нами данным, которые будут опубликованы позже, введение TeA ингибировало активность каталазы в печени (на 36 и 35% соответственно) ($p < 0,05$) и сопровождалось повышением выведения 8-оксо-2-дезоксигуанозина в моче крыс (в 1,6 раза для чистой TeA) ($p < 0,10$).

Работа М.А. Samak и соавт. [52] затрагивала цитотоксические эффекты, связанные с ОС в околоушных железах крыс Wistar, однократное внутрижелудочное введение АОН (10 мг на 1 кг массы тела) приводило к повреждению ДНК в ацинарных клетках (метод ДНК-комет), увеличению содержания 4-гидроксиноненаля (срез ткани), росту уровня МДА и снижению активности каталазы и супероксиддисмутазы (гомогенат ткани) по сравнению с показателями контрольной группы. При этом авторы предполагают, что повышение уровня оксида азота, вызванное АОН, способно являться ключевым медиатором перекисного окисления липидов и вызванной гибели клеток.

Х. Tang и соавт. [53] исследовали генотоксичность АМЕ для крыс Sprague-Dawley и подтвердили наличие повреждений ДНК в печени, почках и селезенке после 28-дневного перорального введения (7,35 мкг на 1 кг

массы тела в сутки). В обсуждении указано, что ОС не играл основной роли в индукции повреждения ДНК, а АМЕ являлся потенциальным ингибитором топоизомеразы и мог способствовать разрывам цепей ДНК. Эквивалентная доза для человека, полученная из BMDL₁₀ и BMDL₅₀ (нижнего доверительного предела дозы), оценивалась в 5,33 и 271,43 нг на 1 кг массы тела в сутки соответственно. Сопоставление с фактическим воздействием на население Китая (6,09 нг на 1 кг массы тела) показало, что для АМЕ оно превышало допустимый показатель в 5,33 нг на 1 кг массы тела, рассчитанный в ходе данного исследования.

В настоящее время отсутствуют публикации по изучению в экспериментах *in vivo* ALT, TEN и периленихинов, особое внимание стоит уделить ATX I, ATX II, ATX III, ALTP и STTX III из-за их высокой цитотоксичности *in vitro*.

При изучении воздействия микотоксинов *Alternaria* на организм необходимо также учитывать и влияние кишечной микробиоты, которая способна проявлять значительную изменчивость. К примеру, было обнаружено, что кишечные микроорганизмы частично подавляют генотоксичность и смягчают вредное воздействие экстракта альтернариатоксинов, не обладают способностью метаболизировать АОН, АМЕ и ALT, а АОН нековалентно связывается с поверхностью бактерий [54–56]. В связи с этим разработка специализированных пищевых продуктов, способных смягчать последствия для желудочно-кишечного тракта за счет наличия PPSP (пробиотиков, пребиотиков, синбиотиков и постбиотиков), может являться полезным способом борьбы с микотоксикозами [56].

Таким образом, исследования *in vivo* доказывают, что некоторые метаболиты грибов рода *Alternaria* (TeA, АОН, АМЕ) представляют риск для здоровья населения и требуют проведения новых экспериментов с целью установления гигиенических регламентов.

Заключение

Результаты исследований альтернариатоксинов по показателям цитотоксичности свидетельствуют о том, что на данный момент достаточный объем данных для подтверждения угрозы здоровью имеется только для АОН. Для остальных токсинов грибов рода *Alternaria* требуется проведение дополнительных исследований на моделях *in vivo* и *in vitro*.

В свете этого следует сделать акцент на проведение дальнейших работ по следующим направлениям:

- оценка комбинированного действия альтернариатоксинов;
- раскрытие дозозависимых эффектов для токсинов грибов рода *Alternaria* в диапазоне, соответствующем их поступлению в организм человека;
- токсикологическая характеристика остальных метаболитов грибов *Alternaria* (более 300 соединений);
- изучение влияния микробиома на метаболизм и связывание альтернариатоксинов в организме.

Сведения об авторах

Конеv Антон Дмитриевич (Anton D. Konev) – лаборант-исследователь лаборатории энзимологии питания ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (Москва, Российская Федерация)

E-mail: konevtonyion@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0976-1415>

Седова Ирина Борисовна (Irina B. Sedova) – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории энзимологии питания ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (Москва, Российская Федерация)

E-mail: isedova@ion.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6011-4515>

Тутельян Виктор Александрович (Victor A. Tutelyan) – академик РАН, доктор медицинских наук, профессор, заведующий лабораторией энзимологии питания, научный руководитель ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», заведующий кафедрой гигиены питания и токсикологии ИПО ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) (Москва, Российская Федерация)

E-mail: tutelyan@ion.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4164-8992>

Литература

- Аксенов И.В., Седова И.Б., Чалый З.А., Тутельян В.А. Альтернатоксинасы как фактор риска для здоровья населения // Анализ риска здоровью. 2023. № 4 С. 146–157. DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2023.4.14>
- Louro H., Vettorazzi A., de Cerain A.L., Spyropoulou A., Solhaug A., Straumfors A. et al. Hazard characterization of Alternaria toxins to identify data gaps and improve risk assessment for human health // Arch. Toxicol. 2024. Vol. 98. P. 425–469. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-023-03636-8>
- Ismail A.M., Elshewy E.S., El-Ganainy S.M., Magista D., Hamouda A.F., Alhudaib K.A. et al. Mycotoxins from tomato pathogenic Alternaria alternata and their combined cytotoxic effects on human cell lines and male albino rats // J. Fungi (Basel). 2023. Vol. 9, N 3. P. 282. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof9030282>
- Perrone G., Ferrara M., Medina A., Pascale M., Magan N. Toxicogenic fungi and mycotoxins in a climate change scenario: ecology, genomics, distribution, prediction and prevention of the risk // Microorganisms. 2020. Vol. 8, N 10. P. 1496. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms8101496>
- EFSA on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Scientific Opinion on the risks for animal and public health related to the presence of Alternaria toxins in feed and food // EFSA J. 2011. Vol. 9, N 10. P. 2407. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2407>
- Lin H., Jia B., Wu A. Cytotoxicities of Co-occurring alternariol, alternariol monomethyl ether and tenuazonic acid on human gastric epithelial cells // Food Chem. Toxicol. 2023. Vol. 17. Article ID 113524. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2022.113524>
- Чалый З.А., Седова И.Б., Спиридонова А.Л., Главица М.И., Компаинцева Д.М., Иванова У.В. и др. Результаты оценки контаминации перца чили и паприки альтернатоксинами как факторы риска здоровью // Анализ риска здоровью. 2024. № 3. С. 30–36. DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2024.3.04>
- Седова И.Б., Чалый З.А., Иванова У.В., Тутельян В.А. Альтернатоксинасы в продуктах переработки томатов, реализуемых на российском рынке // Вопросы питания. 2024. Т. 93, № 1. С. 103–111. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-1-103-111>
- Седова И.Б., Чалый З.А., Спиридонова А.Л., Компаинцева Д.М., Тутельян В.А. Изучение загрязнения микотоксинами фруктовых соков, реализуемых на территории России // Успехи медицинской микологии. Т. 27. Москва : Национальная академия микологии, 2025. С. 278–281. ISBN: 978-5-901578-44-5.
- Pavicich M.A., De Boevre M., Vidal A., Mikula H., Warth B., Marko D. et al. Natural occurrence, exposure assessment & risk characterization of Alternaria mycotoxins in apple by-products in Argentina // Expo Health. 2024. Vol. 16. P. 149–158. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12403-023-00544-1>
- Crudo F., Varga E., Aichinger G., Galaverna G., Marko D., Dall'Asta C. et al. Co-occurrence and combinatory effects of Alternaria mycotoxins and other xenobiotics of food origin: current scenario and future perspectives // Toxins. 2019. Vol. 11, N 11. P. 640. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins11110640>
- Hickert S., Bergmann M., Ersen S., Cramer B., Humpf H.U. Survey of Alternaria toxin contamination in food from the German market, using a rapid HPLC-MS/MS approach // Mycotoxin Res. 2016. Vol. 32, N 1. P. 7–18. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12550-015-0233-7>
- Берестецкий А.О., Далинова А.А., Волосатова Н.С. Метаболитные профили и биологическая активность экстрактов из культуры гриба Alternaria sonchi S-102 при различных способах его культивирования // Прикладная биохимия и микробиология. 2019. Т. 55, № 3. С. 271–281. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0555109919030048>
- Lou J., Fu L., Peng Y., Zhou L. Metabolites from Alternaria fungi and their bioactivities // Molecules. 2013. Vol. 18, N 5. P. 5891–5935. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules18055891>
- Jacob K.D., Noren Hooten N., Trzeciak A.R., Evans M.K. Markers of oxidant stress that are clinically relevant in aging and age-related disease // Mech. Ageing Dev. 2013. Vol. 134, N 3–4. P. 139–157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mad.2013.02.008>
- Vila-Donat P., Fernández-Blanco C., Sagratini G., Font G., Ruiz M.J. Effects of soyasaponin I and soyasaponins-rich extract on the alternariol-induced cytotoxicity on Caco-2 cells // Food Chem. Toxicol. 2015. Vol. 77. P. 44–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2014.12.016>
- Bensassi F., Gallerne C., Sharaf El Dein O., Hajlaoui M.R., Bacha H., Lemaire C. Cell death induced by the Alternaria mycotoxin Alternariol // Toxicol. In Vitro. 2012. Vol. 26, N 6. P. 915–923. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2012.04.014>
- Aichinger G., Beisl J., Marko D. Genistein and delphinidin antagonize the genotoxic effects of the mycotoxin alternariol in human colon carcinoma cells // Mol. Nutr. Food Res. 2017. Vol. 61, N 2. DOI: <https://doi.org/10.1002/mnfr.201600462>
- Aichinger G., Dellaflora L., Pantazi F., Del Favero G., Galaverna G., Dall'Asta C. et al. Alternaria toxins as casein kinase 2 inhibitors and possible consequences for estrogenicity: a hybrid in silico/in vitro study // Arch. Toxicol. 2020. Vol. 94, N 6. P. 2225–2237. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02746-x>
- Balazs A., Faisal Z., Csepregi R., Koszegi T., Kriszt B., Szabó I. et al. In vitro evaluation of the individual and combined cytotoxic and estrogenic effects of zearalenone, its reduced metabolites, alternariol, and genistein // Int. J. Mol. Sci. 2021. Vol. 22, N 12. P. 6281. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms22126281>
- Frizzell C., Ndossi D., Kalayou S., Eriksen G.S., Verhaegen S., Sorlie M. et al. An in vitro investigation of endocrine disrupting effects of the mycotoxin alternariol // Toxicol. Appl. Pharmacol. 2013. Vol. 271, N 1. P. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.taap.2013.05.002>
- Kowalska K., Habrowska-Gorczyńska D.E., Koziół M.J., Urbanek K.A., Dominska K., Piastowska-Ciesielska A.W. Mycotoxin alternariol (AOH) affects viability and motility of mammary breast epithelial cells // Int. J. Mol. Sci. 2021. Vol. 22, N 2. P. 696. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms22020696>
- Kowalska K., Koziół M.J., Urbanek K.A., Habrowska-Gorczyńska D.E., Dominska K., Piastowska-Ciesielska A.W. Estrogen receptor β participates in alternariol-induced oxidative stress in normal prostate epithelial cells // Toxins (Basel). 2021. Vol. 13, N 11. P. 766. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins13110766>
- Solhaug A., Vines L.L., Ivanova L., Spilberg B., Holme J.A., Pestka J. et al. Mechanisms involved in alternariol-induced cell cycle arrest // Mutat. Res. 2012. Vol. 738–739. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2012.09.001>
- Tiemann U., Tomek W., Schneider F., Müller M., Pöhland R., Vanselow J. The mycotoxins alternariol and alternariol methyl ether negatively affect progesterone synthesis in porcine granulosa cells in

- vitro // *Toxicol. Lett.* 2009. Vol. 186, N 2. P. 139–145. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2009.01.014>
26. Dong L., Kim H.J., Cao T.Q., Liu Z., Lee H., Ko W. et al. Anti-inflammatory effects of metabolites from antarctic fungal strain *Pleosporella* sp. SF-7343 in HaCaT human keratinocytes // *Int. J. Mol. Sci.* 2021. Vol. 22, N 18. P. 9674. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms22189674>
27. Lehmann L., Wagner J., Metzler M. Estrogenic and clastogenic potential of the mycotoxin alternariol in cultured mammalian cells // *Food Chem. Toxicol.* 2006. Vol. 44, N 3. P. 398–408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2005.08.013>
28. Brugger E.M., Wagner J., Schumacher D.M., Koch K., Podlech J., Metzler M. et al. Mutagenicity of the mycotoxin alternariol in cultured mammalian cells // *Toxicol. Lett.* 2006. Vol. 164, N 3. P. 221–230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2006.01.001>
29. Vejvodsky K., Sack M., Jarolim K., Aichinger G., Somoza M.M. et al. In vitro combinatory effects of the *Alternaria* mycotoxins alternariol and altertoxin II and potentially involved miRNAs // *Toxicol. Lett.* 2017. Vol. 267. P. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2016.12.011>
30. Tiessen C., Fehr M., Schwarz C., Baechler S., Domnanich K., Böttler U. et al. Modulation of the cellular redox status by the *Alternaria* toxins alternariol and alternariol monomethyl ether // *Toxicol. Lett.* 2013. Vol. 216, N 1. P. 23–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2012.11.005>
31. Pahlke G., Tiessen C., Domnanich K., Kahle N., Groh I.A., Schreck I. et al. Impact of *Alternaria* toxins on CYP1A1 expression in different human tumor cells and relevance for genotoxicity // *Toxicol. Lett.* 2016. Vol. 240, N 1. P. 93–104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2015.10.003>
32. Fernandez-Blanco C., Font G., Ruiz M.J. Oxidative stress of alternariol in Caco-2 cells // *Toxicol. Lett.* 2014. Vol. 229, N 3. P. 458–464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2014.07.024>
33. Fernández-Blanco C., Font G., Ruiz M.J. Oxidative DNA damage and disturbance of antioxidant capacity by alternariol in Caco-2 cells // *Toxicol. Lett.* 2015. Vol. 235, N 2. P. 61–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2015.03.013>
34. Hessel-Pras S., Kieshauser J., Roenn G., Luckert C., Braeuning A., Lampen A. In vitro characterization of hepatic toxicity of *Alternaria* toxins // *Mycotoxin Res.* 2019. Vol. 35, N 2. P. 157–168. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12550-018-0339-9>
35. Bensassi F., Gallerne C., el Dein O.S., Hajlaoui M.R., Bacha H., Lemaire C. Mechanism of Alternariol monomethyl ether-induced mitochondrial apoptosis in human colon carcinoma cells // *Toxicology.* 2011. Vol. 290, N 2–3. P. 230–240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tox.2011.09.087>
36. Mahmoud M.M., Abdel-Razek A.S., Soliman H.S.M., Ponomareva L.V., Thorson J.S., Shaaban K.A. et al. Diverse polyketides from the marine endophytic *Alternaria* sp. LV52: structure determination and cytotoxic activities // *Biotechnol. Rep.* 2022. Vol. 33. Article ID e00628. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00628>
37. Marin D.E., Bulgaru V.C., Perteau A., Grosu I.A., Pistol G.C., Taranu I. Alternariol monomethyl-ether induces toxicity via cell death and oxidative stress in swine intestinal epithelial cells // *Toxins (Basel)*. 2024. Vol. 16, N 5. P. 223. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins16050223>
38. Xiao J., Zhang Q., Gao Y.Q., Tang J.J., Zhang A.L., Gao J.M. Secondary metabolites from the endophytic *Botryosphaeria dothidea* of *Melia azedarach* and their antifungal, antibacterial, antioxidant, and cytotoxic activities // *J. Agric. Food Chem.* 2014. Vol. 62, N 16. P. 3584–3590. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf500054f>
39. Hohenbichler J., Aichinger G., Rychlik M., Del Favero G., Marko D. *Alternaria alternata* toxins synergistically activate the aryl hydrocarbon receptor pathway in vitro // *Biomolecules*. 2020. Vol. 10, N 7. P. 1018. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom10071018>
40. Osborne L.C., Jones V.I., Peeler J.T., Larkin E.P. Transformation of C3H/10T1/2 cells and induction of EBV-early antigen in Raji cells by altertoxins I and III // *Toxicol. In Vitro*. 1988. Vol. 2, N 2. P. 97–102. DOI: [https://doi.org/10.1016/0887-2333\(88\)90019-7](https://doi.org/10.1016/0887-2333(88)90019-7)
41. Schwarz C., Tiessen C., Kreutzer M., Stark T., Hofmann T. et al. Characterization of a genotoxic impact compound in *Alternaria alternata* infested rice as Altertoxin II // *Arch. Toxicol.* 2012. Vol. 86, N 12. P. 1911–1925. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-012-0958-4>
42. Wang Y., Liu H.X., Chen Y.C., Sun Z.H., Li H.H., Li S.N. et al. Two new metabolites from the endophytic fungus *Alternaria* sp. A744 derived from *Morinda officinalis* // *Molecules*. 2017. Vol. 22, N 5. P. 765. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules22050765>
43. Zhao D.L., Cao F., Wang C.Y., Yang L.J., Shi T., Wang K.L. et al. Alternatone A, an unusual perylenequinone-related compound from a soft-coral-derived strain of the fungus *Alternaria alternata* // *J. Nat. Prod.* 2019. Vol. 82, N 11. P. 3201–3204. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.9b00905>
44. Fleck S.C., Sauter F., Pfeiffer E., Metzler M., Hartwig A., Köberle B. DNA damage and repair kinetics of the *Alternaria* mycotoxins alternariol, altertoxin II and stemphyliotoxin III in cultured cells // *Mutat. Res. Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.* 2016. Vol. 798–799. P. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2016.02.001>
45. Qin Y., Zhou H., Yang Y., Guo T., Zhou Y., Zhang Y. et al. Metabolome and its mechanism profiling in the synergistic toxic effects induced by co-exposure of tenuazonic acid and patulin in Caco-2 cells // *Toxins (Basel)*. 2024. Vol. 16, N 7. P. 319. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins16070319>
46. den Hollander D., Holvoet C., Demeyere K., De Zutter N., Audenaert K., Meyer E. Cytotoxic effects of alternariol, alternariol monomethyl-ether, and tenuazonic acid and their relevant combined mixtures on human enterocytes and hepatocytes // *Front. Microbiol.* 2022. Vol. 13, Article ID 849243. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.849243>
47. Bensassi F., Gallerne C., Sharaf El Dein O., Rabeh Hajlaoui M., Bacha H., Lemaire C. Combined effects of alternariols mixture on human colon carcinoma cells // *Toxicol. Mech. Methods*. 2015. Vol. 25, N 1. P. 56–62. DOI: <https://doi.org/10.3109/15376516.2014.985354>
48. Groestlinger J., Seidl C., Varga E., Del Favero G., Marko D. Combinatory exposure to urolithin A, alternariol, and deoxynivalenol affects colon cancer metabolism and epithelial barrier integrity in vitro // *Front. Nutr.* 2022. Vol. 9, Article ID 882222. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.882222>
49. Kumari A., Singh K., Uttam G. Tenuazonic acid-induced mycotoxicosis in an immunosuppressed mouse model and its prophylaxis with cinnamaldehyde // *Chemosphere*. 2024. Vol. 363. Article ID 142812. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142812>
50. Jaiswal A.K., Makhija S., Stahr N., Sandey M., Suryawanshi A., Mishra A. Pyruvate kinase M2 in lung APCs regulates *Alternaria*-induced airway inflammation // *Immunobiology*. 2020. Vol. 225, N 4, Article ID 151956. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.imbio.2020.151956>
51. Конев А.Д. Тенуазоновая кислота усиливает перекисное окисление липидов в печени крыс // *Успехи медицинской микологии*. Т. 27. Москва : Национальная академия микологии. 2025. С. 254–256. ISBN: 978-5-901578-44-5.
52. Samak M.A., Elshatory A., Mohamed E.M. Outcomes of gallic acid on alternariol induced cyto-morphic and genotoxic in vivo changes in parotid gland: 4-HNE incorporated // *Biomedicines*. 2019. Vol. 7, N 4. P. 84. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomedicines7040084>
53. Tang X., Chen Y., Zhu X., Miao Y., Wang D., Zhang J. et al. Alternariol monomethyl ether toxicity and genotoxicity in male Sprague-Dawley rats: 28-day in vivo multi-endpoint assessment // *Mutat. Res. Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.* 2022. Vol. 873, Article ID 503435. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2021.503435>
54. Lemke A., Burkhardt B., Bunzel D., Pfeiffer E., Metzler M., Huch M. et al. *Alternaria* toxins of the alternariol type are not metabolised by human faecal microbiota // *World Mycotoxin J.* 2016. Vol. 9, N 1. P. 41–50. DOI: <https://doi.org/10.3920/WMJ2014.1875>
55. Crudo F., Aichinger G., Mihajlovic J., Dellaflora L., Varga E., Puntschner H. et al. Gut microbiota and undigested food constituents modify toxin composition and suppress the genotoxicity of a naturally occurring mixture of *Alternaria* toxins in vitro // *Arch. Toxicol.* 2020. Vol. 94, P. 3541–3552. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02831-159>
56. Lazaro A., Vila-Donat P., Manyes L. Emerging mycotoxins and preventive strategies related to gut microbiota changes: probiotics, prebiotics, and postbiotics – a systematic review // *Food Funct.* 2024. Vol. 15, N 18. P. 8998–9023. DOI: <https://doi.org/10.1039/d4fo01705f>

References

1. Aksenov I.V., Sedova I.B., Chaly Z.A., Tutel'yan V.A. *Alternaria* toxins as a risk factor for population health. Analiz riska zdorov'yu [Health Risk Analysis]. 2023; (4): 146–57. DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2023.4.14> (in Russian)
2. Louro H., Vettorazzi A., de Cerain A.L., Spyropoulou A., Solhaug A., Straumfors A., et al. Hazard characterization of *Alternaria* toxins to identify data gaps and improve risk assessment for human health. *Arch. Toxicol.* 2024; 98: 425–69. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-023-03636-8>
3. Ismail A.M., Elshewy E.S., El-Ganainy S.M., Magista D., Hamouda A.F., Alhudaib K.A., et al. Mycotoxins from tomato pathogenic *Alternaria alternata* and their combined cytotoxic effects on human cell lines

- and male albino rats. *J Fungi* (Basel). 2023; 9 (3): 282. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof9030282>
4. Perrone G., Ferrara M., Medina A., Pascale M., Magan N. Toxigenic fungi and mycotoxins in a climate change scenario: ecology, genomics, distribution, prediction and prevention of the risk. *Microorganisms*. 2020; 8 (10): 1496. DOI: <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS8101496>
 5. EFSA on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Scientific Opinion on the risks for animal and public health related to the presence of *Alternaria* toxins in feed and food. *EFSA J*. 2011; 9 (10): 2407. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2407>
 6. Lin H., Jia B., Wu A. Cytotoxicities of Co-occurring alternariol, alternariol monomethyl ether and tenuazonic acid on human gastric epithelial cells. *Food Chem Toxicol*. 2023; 17: 113524. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2022.113524>
 7. Chaly Z.A., Sedova I.B., Spiridonova A.L., Glavitsa M.I., Kompaintseva D.M., Ivanova U.V., et al. Study of chili peppers and paprika contamination with *Alternaria* toxins as health risk factors. *Analiz riska zdorov'yu* [Health Risk Analysis]. 2024; (3): 30–6. DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2024.3.04> (in Russian)
 8. Sedova I.B., Chaly Z.A., Ivanova U.V., Tutel'yan V.A. *Alternaria* toxins in tomato products marketed in the Russian Federation. *Voprosy pitaniia* [Problems of Nutrition]. 2024; 93 (1): 103–11. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-1-103-111> (in Russian)
 9. Sedova I.B., Chaly Z.A., Spiridonova A.L., Kompaintseva D.M., Tutel'yan V.A. Study of contamination by mycotoxins in fruit juices sold in Russia. In: *Successes of Medical Mycology*. Vol. 27. Moscow: Natsional'naya akademiya mikologii, 2025: 278–81. ISBN: 978-5-901578-44-5. (in Russian)
 10. Pavich M.A., De Boevre M., Vidal A., Mikula H., Warth B., Marko D., et al. Natural occurrence, exposure assessment & risk characterization of *Alternaria* mycotoxins in apple by-products in Argentina. *Expo Health*. 2024; 16: 149–58. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12403-023-00544-1>
 11. Crudo F., Varga E., Aichinger G., Galaverna G., Marko D., Dall'Asta C., et al. Co-occurrence and combinatory effects of *Alternaria* mycotoxins and other xenobiotics of food origin: current scenario and future perspectives. *Toxins*. 2019; 11 (11): 640. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins11110640>
 12. Hickert S., Bergmann M., Ersen S., Cramer B., Humpf H.U. Survey of *Alternaria* toxin contamination in food from the German market, using a rapid HPLC-MS/MS approach. *Mycotoxin Res*. 2016; 32 (1): 7–18. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12550-015-0233-7>
 13. Berestetsky A.O., Dalinova A.A., Volosatova N.S. Metabolite profiles and biological activity of extracts from the culture of the fungus *Alternaria sonchi* S-102 under different methods of its cultivation. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya* [Applied Biochemistry and Microbiology]. 2019; 55 (3): 271–81. DOI: <https://doi.org/10.1134/S055519919030048> (in Russian)
 14. Lou J., Fu L., Peng Y., Zhou L. Metabolites from *Alternaria* fungi and their bioactivities. *Molecules*. 2013; 18 (5): 5891–935. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules18055891>
 15. Jacob K.D., Noren Hooten N., Trzeciak A.R., Evans M.K. Markers of oxidant stress that are clinically relevant in aging and age-related disease. *Mech Ageing Dev*. 2013; 134 (3–4): 139–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mad.2013.02.008>
 16. Vila-Donat P., Fernández-Blanco C., Sagratini G., Font G., Ruiz M.J. Effects of soyasaponin I and soyasaponins-rich extract on the alternariol-induced cytotoxicity on Caco-2 cells. *Food Chem Toxicol*. 2015; 77: 44–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2014.12.016>
 17. Bensassi F., Gallerne C., Sharaf El Dein O., Hajlaoui M.R., Bacha H., Lemaire C. Cell death induced by the *Alternaria* mycotoxin Alternariol. *Toxicol In Vitro*. 2012; 26 (6): 915–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2012.04.014>
 18. Aichinger G., Beisl J., Marko D. Genistein and delphinidin antagonize the genotoxic effects of the mycotoxin alternariol in human colon carcinoma cells. *Mol Nutr Food Res*. 2017; 61 (2). DOI: <https://doi.org/10.1002/mnfr.201600462>
 19. Aichinger G., Dellafiora L., Pantazi F., Del Favero G., Galaverna G., Dall'Asta C., et al. *Alternaria* toxins as casein kinase 2 inhibitors and possible consequences for estrogenicity: a hybrid in silico/in vitro study. *Arch Toxicol*. 2020; 94 (6): 2225–37. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02746-x>
 20. Balazs A., Faisal Z., Csepregi R., Koszegi T., Kriszt B., Szabó I., et al. In vitro evaluation of the individual and combined cytotoxic and estrogenic effects of zearalenone, its reduced metabolites, alternariol, and genistein. *Int J Mol Sci*. 2021; 22 (12): 6281. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms22126281>
 21. Frizzell C., Ndossi D., Kalayou S., Eriksen G.S., Verhaegen S., Sorlie M., et al. An in vitro investigation of endocrine disrupting effects of the mycotoxin alternariol. *Toxicol Appl Pharmacol*. 2013; 271 (1): 64–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.taap.2013.05.002>
 22. Kowalska K., Habrowska-Gorczyńska D.E., Kozieł M.J., Urbanek K.A., Dominska K., Piastowska-Ciesielska A.W. Mycotoxin alternariol (AOH) affects viability and motility of mammary breast epithelial cells. *Int J Mol Sci*. 2021; 22 (2): 696. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms22020696>
 23. Kowalska K., Kozieł M.J., Urbanek K.A., Habrowska-Gorczyńska D.E., Dominska K., Piastowska-Ciesielska A.W. Estrogen receptor β participates in alternariol-induced oxidative stress in normal prostate epithelial cells. *Toxins* (Basel). 2021; 13 (11): 766. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins13110766>
 24. Solhaug A., Vines L.L., Ivanova L., Spilsberg B., Holme J.A., Pestka J., et al. Mechanisms involved in alternariol-induced cell cycle arrest. *Mutat Res*. 2012; 738–739: 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2012.09.001>
 25. Tiemann U., Tomek W., Schneider F., Müller M., Pöhland R., Vanselow J. The mycotoxins alternariol and alternariol methyl ether negatively affect progesterone synthesis in porcine granulosa cells in vitro. *Toxicol Lett*. 2009; 186 (2): 139–45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2009.01.014>
 26. Dong L., Kim H.J., Cao T.Q., Liu Z., Lee H., Ko W., et al. Anti-inflammatory effects of metabolites from antarctic fungal strain *Pleospirales* sp. SF-7343 in HaCaT human keratinocytes. *Int J Mol Sci*. 2021; 22 (18): 9674. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms22189674>
 27. Lehmann L., Wagner J., Metzler M. Estrogenic and clastogenic potential of the mycotoxin alternariol in cultured mammalian cells. *Food Chem Toxicol*. 2006; 44 (3): 398–408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2005.08.013>
 28. Brugger E.M., Wagner J., Schumacher D.M., Koch K., Podlech J., Metzler M., et al. Mutagenicity of the mycotoxin alternariol in cultured mammalian cells. *Toxicol Lett*. 2006; 164 (3): 221–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2006.01.001>
 29. Vejdovsky K., Sack M., Jarolim K., Aichinger G., Somoza M.M., et al. In vitro combinatory effects of the *Alternaria* mycotoxins alternariol and altretoxin II and potentially involved miRNAs. *Toxicol Lett*. 2017; 267: 45–52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2016.12.011>
 30. Tiessen C., Fehr M., Schwarz C., Baechler S., Domnanich K., Böttler U., et al. Modulation of the cellular redox status by the *Alternaria* toxins alternariol and alternariol monomethyl ether. *Toxicol Lett*. 2013; 216 (1): 23–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2012.11.005>
 31. Pahlke G., Tiessen C., Domnanich K., Kahle N., Groh I.A., Schreck I., et al. Impact of *Alternaria* toxins on CYP1A1 expression in different human tumor cells and relevance for genotoxicity. *Toxicol Lett*. 2016; 240 (1): 93–104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2015.10.003>
 32. Fernandez-Blanco C., Font G., Ruiz M.J. Oxidative stress of alternariol in Caco-2 cells. *Toxicol Lett*. 2014; 229 (3): 458–64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2014.07.024>
 33. Fernández-Blanco C., Font G., Ruiz M.J. Oxidative DNA damage and disturbance of antioxidant capacity by alternariol in Caco-2 cells. *Toxicol Lett*. 2015; 235 (2): 61–6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2015.03.013>
 34. Hessel-Pras S., Kieshauser J., Roenn G., Luckert C., Braeuning A., Lampen A. In vitro characterization of hepatic toxicity of *Alternaria* toxins. *Mycotoxin Res*. 2019; 35 (2): 157–68. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12550-018-0339-9>
 35. Bensassi F., Gallerne C., el Dein O.S., Hajlaoui M.R., Bacha H., Lemaire C. Mechanism of Alternariol monomethyl ether-induced mitochondrial apoptosis in human colon carcinoma cells. *Toxicology*. 2011; 290 (2–3): 230–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tox.2011.09.087>
 36. Mahmoud M.M., Abdel-Razek A.S., Soliman H.S.M., Ponomareva L.V., Thorson J.S., Shaaban K.A., et al. Diverse polyketides from the marine endophytic *Alternaria* sp. LV52: structure determination and cytotoxic activities. *Biotechnol Rep*. 2022; 33: e00628. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00628>
 37. Marin D.E., Bulgaru V.C., Perteau A., Grosu I.A., Pistol G.C., Taranu I. Alternariol monomethyl-ether induces toxicity via cell death and oxidative stress in swine intestinal epithelial cells. *Toxins* (Basel). 2024; 16 (5): 223. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins16050223>
 38. Xiao J., Zhang Q., Gao Y.Q., Tang J.J., Zhang A.L., Gao J.M. Secondary metabolites from the endophytic *Botryosphaeria dothidea* of *Melia azedarach* and their antifungal, antibacterial, antioxidant, and cytotoxic activities. *J Agric Food Chem*. 2014; 62 (16): 3584–90. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf500054f>
 39. Hohenbichler J., Aichinger G., Rychlik M., Del Favero G., Marko D. *Alternaria alternata* toxins synergistically activate the aryl hydrocarbon receptor pathway in vitro. *Biomolecules*. 2020; 10 (7): 1018. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom10071018>
 40. Osborne L.C., Jones V.I., Peeler J.T., Larkin E.P. Transformation of C3H/10T1/2 cells and induction of EBV-early antigen in Raji cells by altretoxins I and III. *Toxicol In Vitro*. 1988; 2 (2): 97–102. DOI: [https://doi.org/10.1016/0887-2333\(88\)90019-7](https://doi.org/10.1016/0887-2333(88)90019-7)
 41. Schwarz C., Tiessen C., Kreutzer M., Stark T., Hofmann T., et al. Characterization of a genotoxic impact compound in *Alternaria alter-*

- nata infested rice as Alternatoxin II. Arch Toxicol. 2012; 86 (12): 1911–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-012-0958-4>
42. Wang Y., Liu H.X., Chen Y.C., Sun Z.H., Li H.H., Li S.N., et al. Two new metabolites from the endophytic fungus *Alternaria* sp. A744 derived from *Morinda officinalis*. Molecules. 2017; 22 (5): 765. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules22050765>
43. Zhao D.L., Cao F., Wang C.Y., Yang L.J., Shi T., Wang K.L., et al. Alternatone A, an unusual perylenequinone-related compound from a soft-coral-derived strain of the fungus *Alternaria alternata*. J Nat Prod. 2019; 82 (11): 3201–4. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.9b00905>
44. Fleck S.C., Sauter F., Pfeiffer E., Metzler M., Hartwig A., Köberle B. DNA damage and repair kinetics of the *Alternaria* mycotoxins alternariol, alternatoxin II and stemphyliotoxin III in cultured cells. Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen. 2016; 798–799: 27–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2016.02.001>
45. Qin Y., Zhou H., Yang Y., Guo T., Zhou Y., Zhang Y., et al. Metabolome and its mechanism profiling in the synergistic toxic effects induced by co-exposure of tenuazonic acid and patulin in Caco-2 cells. Toxins (Basel). 2024; 16 (7): 319. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins16070319>
46. den Hollander D., Holvoet C., Demeyere K., De Zutter N., Audenaert K., Meyer E. Cytotoxic effects of alternariol, alternariol monomethyl-ether, and tenuazonic acid and their relevant combined mixtures on human enterocytes and hepatocytes. Front Microbiol. 2022; 13: 849243. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.849243>
47. Bensassi F., Gallerne C., Sharaf El Dein O., Rabeh Hajlaoui M., Bacha H., Lemaire C. Combined effects of alternariols mixture on human colon carcinoma cells // Toxicol. Mech. Methods. 2015. Vol. 25, N 1. P. 56–62. DOI: <https://doi.org/10.3109/15376516.2014.985354>
48. Groestlinger J., Seidl C., Varga E., Del Favero G., Marko D. Combinatory exposure to urolithin A, alternariol, and deoxynivalenol affects colon cancer metabolism and epithelial barrier integrity in vitro. Front Nutr. 2022; 9: 882222. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.882222>
49. Kumari A., Singh K., Uttam G. Tenuazonic acid-induced mycotoxicosis in an immunosuppressed mouse model and its prophylaxis with cinnamaldehyde. Chemosphere. 2024; 363: 142812. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142812>
50. Jaiswal A.K., Makhija S., Stahr N., Sandey M., Suryawanshi A., Mishra A. Pyruvate kinase M2 in lung APCs regulates *Alternaria*-induced airway inflammation. Immunobiology. 2020; 225 (4): 151956. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.imbio.2020.151956>
51. Konev A.D. Tenuazonic acid enhances lipid peroxidation in rat liver. In: Successes of Medical Mycology. Vol. 27. Moscow: Natsional'naya akademiya mikologii, 2025: 254–56. ISBN: 978-5-901578-44-5. (in Russian)
52. Samak M.A. Elshatory A., Mohamed E.M. Outcomes of gallic acid on alternariol induced cyto-morphic and genotoxic in vivo changes in parotid gland: 4-HNE incorporated. Biomedicines. 2019; 7 (4): 84. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomedicines7040084>
53. Tang X., Chen Y., Zhu X., Miao Y., Wang D., Zhang J., et al. Alternariol monomethyl ether toxicity and genotoxicity in male Sprague-Dawley rats: 28-day in vivo multi-endpoint assessment. Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen. 2022; 873: 503435. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2021.503435>
54. Lemke A., Burkhardt B., Bunzel D., Pfeiffer E., Metzler M., Huch M., et al. *Alternaria* toxins of the alternariol type are not metabolised by human faecal microbiota. World Mycotoxin J. 2016; 9 (1): 41–50. DOI: <https://doi.org/10.3920/WMJ2014.1875>
55. Crudo F., Aichinger G., Mihajlovic J., Dellaflora L., Varga E., Puntschner H., et al. Gut microbiota and undigested food constituents modify toxin composition and suppress the genotoxicity of a naturally occurring mixture of *Alternaria* toxins in vitro. Arch Toxicol. 2020; 94: 3541–52. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02831-159>
56. Lazaro A., Vila-Donat P., Manyes L. Emerging mycotoxins and preventive strategies related to gut microbiota changes: probiotics, prebiotics, and postbiotics – a systematic review. Food Funct. 2024; 15 (18): 8998–9023. DOI: <https://doi.org/10.1039/d4fo01705f>

Для корреспонденции

Титова Дарья Игоревна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ
Адрес: 249035, Российская Федерация, Калужская область, г. Обнинск, Киевское ш., д. 1, корп. 1
Телефон: (484) 399-69-50
E-mail: contactforinfo@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5790-9958>

Титова Д.И., Меджидов И.М., Харламов В.А.

Идентификация факта радиационной деконтаминации специй, реализуемых на российском рынке: результаты исследований с использованием электронного парамагнитного резонанса

The radiation decontamination detecting in commercial spices marketed in Russia: interpreting the spectra of electron paramagnetic resonance

Titova D.I., Medzhidov I.M.,
Kharlamov V.A.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская область, г. Обнинск, Российская Федерация

Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre "Kurchatov Institute", 249035, Obninsk, Russian Federation

Для увеличения сроков годности и снижения микробной контаминации специй, широко используемых для самых разных целей (красители, консерванты, усилители вкуса и аромата), перед продажей и использованием потребителем регулярно подвергают радиационной деконтаминации. Хотя употребляют специи в небольших количествах, важно, что их добавляют во многие разнообразные продукты, в том числе готовые к употреблению. В связи с этим оценка факта радиационной деконтаминации специй является актуальной.

Цель исследования – применение метода электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) для идентификации факта радиационной деконтаминации готовой продукции (специй), оценка изменения интенсивности ЭПР-сигнала в зависимости от поглощенной дозы и затухания сигнала с течением времени.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания по Программе деятельности Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Вклад авторов. Дизайн исследования – Харламов В.А., Меджидов И.М.; сбор и обработка материала – Меджидов И.М., Харламов В.А.; статистическая обработка данных – Меджидов И.М.; написание текста статьи – Титова Д.И.; редактирование, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи – все авторы.

Для цитирования: Титова Д.И., Меджидов И.М., Харламов В.А. Идентификация факта радиационной деконтаминации специй, реализуемых на российском рынке: результаты исследований с использованием электронного парамагнитного резонанса // Вопросы питания. 2025. Т. 94, № 6. С. 58–68. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-58-68>

Статья поступила в редакцию 02.06.2025. **Принята в печать** 17.11.2025.

Funding. The study was carried out within the framework of the state assignment under the Program of Activities of the National Research Centre "Kurchatov Institute".

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Contribution. Research design – Kharlamov V.A., Medzhidov I.M.; data collection and processing – Medzhidov I.M., Kharlamov V.A.; statistical data processing – Medzhidov I.M.; manuscript writing – Titova D.I.; edition, adoption of the final article, responsibility for the integrity of all parts of the article – all authors.

For citation: Titova D.I., Medzhidov I.M., Kharlamov V.A. The radiation decontamination detecting in commercial spices marketed in Russia: interpreting the spectra of electron paramagnetic resonance. Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]. 2025; 94 (6): 58–68. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-58-68> (in Russian)

Received 02.06.2025. **Accepted** 17.11.2025

Материал и методы. Образцы сухих специй (имбирь молотый, корица молотая, куркума) обрабатывали на гамма-установке ^{60}Co с поглощенными дозами 1, 3, 5, 7 и 10 кГр. На спектрометре ЭПР получали спектры опытных и контрольных образцов сразу после обработки (0 сут), спустя 7, 14, 28, 90, 180 и 270 сут.

Результаты. G-фактор специй равен 2,0042, что означает наличие углеродосодержащих радикалов. ЭПР-сигнал возрастал с увеличением дозы облучения, что подтверждает увеличение концентрации парамагнитных центров. Радиационная обработка дозами 1–10 кГр приводила к дозозависимому статистически значимому увеличению ЭПР-сигнала относительно контроля: на 87–527% для молотого имбиря, на 110–657% для молотой корицы, на 252–826% для куркумы. Быстрое затухание сигнала специй происходило в первые полмесяца хранения от момента обработки ^{60}Co , с последующим более медленным снижением сигнала в течение 9 мес. Затухание ЭПР-сигнала радиационно-обработанных специй спустя первые 7 сут было максимальным: на 37–60% для молотого имбиря, на 48–72% для молотой корицы и на 47–71% для куркумы.

Заключение. После обработки гамма-излучением специй происходят окислительные процессы и образуются свободные радикалы, что подтверждают зарегистрированные ЭПР-сигналы. Контрольные и опытные образцы однозначно можно отличить друг от друга, что позволяет отсортировать радиационно-обработанные от необработанных. Радиационную обработку специй дозами до 10 кГр можно детектировать по интенсивности (амплитуде) ЭПР-сигналов в течение 9 мес. Оценка спектров ЭПР может применяться для установления факта радиационной деконтаминации и, следовательно, для мониторинга монокомпонентных специй, реализуемых на потребительском рынке России.

Ключевые слова: пищевая продукция; специи; ионизирующее излучение; радиационная обработка; выявление; ЭПР-спектрометрия

To increase shelf life and reduce microbial contamination, spices, widely used for a variety of purposes (coloring and preserving agents, flavor enhancers), are regularly subjected to radiation decontamination before subsequent sale and use by consumers. Although spices are consumed only in small amounts, it's important to note that they are added to a wide variety of foods, including ready-to-eat ones. Therefore, assessing the spice radiation decontamination fact of spices is relevant.

The aim of the study was to apply electron paramagnetic resonance (EPR) spectra to identify the fact of radiation decontamination of finished foods (spices), to assess the signal intensity varies depending on the absorbed dose and attenuation kinetics of the spectra signal over time.

Material and methods. Samples of dry spices (ginger, ground cinnamon, and turmeric) were irradiated with ^{60}Co γ -rays at absorbed doses of 1, 3, 5, 7 and 10 kGy. For the irradiated and control samples, spectra were recorded on an electron paramagnetic resonance spectrometer and signals were detected. Spectra were recorded immediately after irradiation and after 7, 14, 28, 90, 180 and 270 days.

Results. The G-factor was 2.0042 for all spice spectra, indicating the carbon-containing radicals' presence. The EPR signal intensity increased with radiation dose elevation, confirming raise in the level of the presented paramagnetic centers. After 1–10 kGy radiation treatment, the signal intensity increased by 87–527% for ginger, by 110–657% for ground cinnamon and by 252–826% for turmeric. The kinetics of signal attenuation demonstrated a significant decrease in intensity during the first 14 days after irradiation of all the tested spices, with subsequent slower attenuation over the next 9 months. The signal intensity attenuation was maximal in the first 7 days for ginger (37–60%), for ground cinnamon (48–72%), as for turmeric (47–71%).

Conclusion. After the γ -radiation treatment of the spices, oxidative processes occur and free radicals were formed, as indicated by the recorded EPR signals. Irradiated samples were clearly differed from control, allowing for the separation of radiation-treated samples from untreated. Treatments at 1–10 kGy could be differentiated based on the signal's intensity. EPR spectra assessment can be used to determine the fact of radiation treatment and, therefore, for radiation monitoring on the Russian consumer market for mono-component spices.

Keywords: food; spices; ionizing radiation; irradiation processing; detection; EPR spectrometry

Питание играет ведущую роль в поддержании здоровья, увеличении продолжительности жизни и сохранении работоспособности человека. Ускоренный темп современной жизни сопровождается чрезмерными по интенсивности и длительности воздействиями экзо-

и эндогенных факторов риска, в том числе от употребления жирной пищи, алкоголя, никотина на фоне в целом несбалансированного питания и ограничения физической подвижности [1]. Современный образ жизни человека вместе с изменением рациона питания [2] привел

к росту таких заболеваний, как ожирение, болезни сердечно-сосудистой системы, онкологические патологии [1]. В условиях урбанизации в рационе питания усилился дисбаланс макро- и микроэлементов [2]. Отмечается значительное возрастание спроса и употребления готовых блюд [3, 4]. С повышением спроса связывают и увеличение объема мирового рынка специй и приправ [4].

Специи и ароматические пряные травы являются универсальными и наиболее широко используемыми ингредиентами в кухнях всего мира, применяются для приготовления разнообразных блюд, при консервировании, поэтому имеют глобальную значимость в кулинарии как домашней, так и профессиональной. Поэтому чем чище специи, ниже их контаминация, тем выше микробиологическая безопасность; срок годности продуктов продлевается. К специям относят сушеные растения или их части: корни, кору, цветки, семена и др., используемые для придания вкуса, цвета и аромата продуктам. В отличие от специй, пряные травы производят из листьев [5]. Специи и травы являются теми товарами, которые наиболее часто фальсифицируются и вовлечены в продовольственное мошенничество [4]. Их импортируют по всему миру, в основном из стран с тропическим либо субтропическим климатом [5]. На 2015 г. на мировом рынке специй и пряных трав лидировала Азия (81%), затем шли Африка (12%), Латинская Америка и страны Карибского бассейна (3,7%), доля стран Европейского союза была менее 2%. Обычно специи и травы реализуют уже в измельченном виде, а цепочка их поставок на рынок довольно длинная и сложная, поэтому в некоторых звеньях этой цепочки возможна фальсификация либо продовольственное мошенничество [4]. Специи и травы, которые были выращены или хранились в ненадлежащих условиях, могут иметь высокий уровень естественной обсемененности патогенными бактериями, грибами, токсигенной плесенью и микотоксинами. Однако даже при соблюдении необходимых мер для выращивания и хранения высока вероятность поражения продукции. Высокая температура, проливные дожди и влажность в регионе производства способствуют росту плесеней и к загрязнению специй и трав микотоксинами. Считается, что распространенность микотоксинов в специях выше по сравнению с пряными травами. В России содержание микотоксинов в специях и пряных травах не регламентируется [5], а наибольшую опасность для здоровья человека представляют присутствующие на российском рынке специи и травы, загрязненные афлатоксинами (преимущественно афлатоксином В1) [5].

Радиационная деконтаминация пищевых продуктов ионизирующим излучением проводится прежде всего для продления сроков годности, повышения безопасности и качества. Диапазон поглощенных доз для эффективной обработки разных видов продукции достаточно хорошо изучен [6]. Радиационная деконтаминация считается быстрым, эффективным и малозатратным методом обработки пищевых продуктов [4, 7]

и в настоящее время тестируется на различных пищевых продуктах, включая продукты, предназначенные для людей с ослабленным иммунитетом, для детского питания [3]. Для продуктов с низким содержанием влаги, таких как травы и специи, используется высокодозная радиационная деконтаминация, обычно гамма-излучением – от 10 кГр (в Европейском союзе) до 30 кГр (в США) [4]. Сообщается о безопасности и эффективности применения доз свыше 10 кГр для специй. Примерно 70% пищевой продукции с целью деконтаминации обрабатывают гамма-излучением ^{60}Co [3]. Однако широкое применение радиационной деконтаминации ограничено ввиду недостаточно организованного контроля и сертифицирования обработанной продукции [8]. В единичных случаях проводят контрольные лабораторные исследования на соответствие обработанной продукции стандартам качества и безопасности, отсутствие продуктов радиолитиза, деструкции тканей и материалов упаковки [8]. Контроль и сертификация обработанной продукции актуальны для специй. Во-первых, специи обрабатываются в расфасованном виде, поэтому возможно образование побочных продуктов от упаковочного материала [4]. Во-вторых, после радиационной деконтаминации необходимо сохранить антиоксидантный потенциал специй [9].

На сегодняшний день радиационная деконтаминация продукции сельского хозяйства плохо принимается потребителями [4], хотя наибольший риск для здоровья представляют продукты, ввозимые или произведенные на территориях, подвергшихся техногенным радиационным авариям [10]. Радиационная деконтаминация часто ассоциируется у потребителей с чем-то вредным для здоровья, что объясняет негативную реакцию на радиационно-обработанную продукцию, представленную на рынке [4]. Поэтому важен контроль процесса радиационной деконтаминации [7], что будет поддерживать должный уровень безопасности продуктов для потребителей [4]. Помимо этого, важна эффективная идентификация, которая позволит выявлять в обороте: 1) продукцию, радиационная деконтаминация которой запрещена; 2) радиационно-обработанную продукцию, не имеющую соответствующей информации об обработке на этикетке либо в наименовании; 3) установление соответствия требованиям для режимов обработки, которые применялись к продукции [6]. Важной задачей является в том числе предотвращение повторной радиационной деконтаминации продуктов, которая запрещена. Этот риск возникает, когда для снижения затрат используют комбинированные методы обработки продукции – радиационно-термическая пастеризация. Продукты сначала проходят термическую обработку, а затем радиационную в дозе, которая в полтора раза ниже от требуемой стандартами [11]. В многокомпонентных продуктах, например в биологически активных (диетических) добавках к пище, радиационно обрабатывают некоторые компоненты. Как сообщается, компоненты биологически активных добавок к пище обычно поставляются из регионов Азии, где они проходят процедуру

радиационной деkontаминации [11], что позволяет привести их в соответствие с санитарно-гигиеническими нормативами.

Важно подчеркнуть, что сам факт радиационной деkontаминации возможно подтвердить. Непрерывно проводится разработка и усовершенствование методов, позволяющих установить факт радиационной деkontаминации продукта, и оценить, в какой дозе она проведена [4]. Существует несколько методов, которые могут быть использованы для подтверждения радиационной деkontаминации продуктов [4]. Одним из распространенных в использовании является метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [12]. Ионизирующее излучение индуцирует появление свободных радикалов, которые стабильны с течением времени, являются парамагнитными центрами и позволяют получить спектры ЭПР [4, 7]. Метод ЭПР помогает одновременно оценить общую антиоксидантную активность [13], что важно для радиационно-обработанного продукта. ЭПР является стандартным методом подтверждения радиационной деkontаминации мясной продукции, содержащей костную ткань [6], так как радиационно-индуцированный ЭПР-сигнал обнаруживается даже после термического воздействия [7], хотя для идентификации обработанного мяса и мясных продуктов перспективно использование также методов липидомики (по глобальному липидному профилю) [14]. Метод ЭПР также является стандартным для продуктов, содержащих кристаллический сахар и целлюлозу [6]. Контрольные исследования специй методом ЭПР после радиационной деkontаминации на промышленных установках начали проводить в 1970-х гг. [7]. В настоящее время специи и сухие приправы [4, 7], а также смеси специй [15], т.е. сочетания перемешанных специй и пряных трав, которые являются дополнением к разным блюдам [5], – это продукты, радиационная деkontаминация которых наиболее популярна и распространена. Однако авторы опубликованных исследований специй и трав после радиационной деkontаминации, проведенных методом ЭПР-спектрометрии, отмечают, что тип ЭПР-сигналов и их стабильность с течением времени сильно зависят от материала пробы, температуры, влажности, присутствия кислорода и других факторов, в связи с чем целесообразны получение и оценка спектров ЭПР для каждого типа продукции [7].

Цель исследования – применение метода ЭПР для идентификации факта радиационной деkontаминации готовой продукции (специй), оценка изменения интенсивности (амплитуды) ЭПР-сигнала в зависимости от поглощенной дозы и затухания сигнала с течением времени.

Материал и методы

В рамках выполнения работы использовали сухие специи: имбирь (*Zingiber officinale*) (ООО «Продлогистика», РФ, 2024 г. урожая), корица молотая (*Cinnamomum*

verum) (ООО «Специи Сибири», РФ, 2024 г. урожая), куркума (*Curcuma longa*) (ООО «Специи Сибири», РФ, 2024 г. урожая). В эксперименте использовали специи, поставляемые в герметичной заводской упаковке. Сразу после вскрытия упаковки образцы расфасовали в полипропиленовые пробирки емкостью 1 мл. Исходную массовую долю влаги (%) измеряли методом высушивания в сушильном шкафу до постоянной массы при 102 °С. Массовая доля влаги образцов имбиря составила 6,4±0,06%; корицы – 6,0±0,13%; куркумы – 6,3±0,06%, что соответствует нормативным показателям для данной продукции (ГОСТ ISO 1003-2016 «Пряности. Имбирь (*Zingiber officinale* Roscoe). Технические условия», ГОСТ ISO 6539-2016 «Пряности. Корица (*Cinnamomum zeylanicum* Blume). Технические условия»; ГОСТ ISO 5562-2017 «Пряности. Куркума целая и молотая (порошкообразная). Технические условия»).

Радиационную обработку ⁶⁰Со образцов проводили на уникальной научной установке (УНУ ГУР-120 № 2795259). Мощность дозы – 5000 Гр/ч. Поглощенные дозы гамма-излучения составили – 1, 3, 5, 7 и 10 кГр. Диапазон доз был выбран в соответствии с реально используемыми для радиационной деkontаминации специй и с заведомым понижением от максимально применяемых доз. Дозиметрический контроль выполняли в соответствии с ГОСТ 34155-2017 «Руководство по дозиметрии при исследовании влияния радиации на пищевые и сельскохозяйственные продукты» и ГОСТ 8.664-2019 «Государственная система обеспечения единства измерений. Пищевые продукты. Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к дозиметрическому обеспечению». Для оценки затухания ЭПР-сигнала спектрометрию проводили сразу после обработки (0 сут), а затем через 7, 14, 28, 90, 180 и 270 сут, в том числе и контрольных образцов. В качестве контроля использовали образцы (0 кГр) без обработки.

После радиационной обработки образцы помещали в герметично закрытые пластиковой пробкой кварцевые пробирки, поэтому влажность образцов в конце периода хранения не превышала начального показателя. В таком виде на протяжении всего эксперимента образцы хранили в лабораторной комнате в темном шкафу при относительной влажности окружающего воздуха не более 75% и температуре не выше 20 °С. В соответствии с требованиями ГОСТ 31672-2012 «Продукты пищевые. Метод электронного парамагнитного резонанса для выявления радиационно-обработанных продуктов, содержащих целлюлозу» проведение измерений должно быть при температуре окружающего воздуха 10–35 °С и влажности 45–80%.

Пробоподготовку для ЭПР-спектрометрии проводили путем измельчения в фарфоровой ступке с пестиком, затем просеивания через сито с размером ячеек 0,5 мм. Затем проводили анализ полученных проб на спектрометре ЭПР ESR70-03 XD/2 (Беларусь) на микроволновой полосе X. Частота сверхвысокочастотного излучения (СВЧ) составляла 9,4 ГГц. Навеску сухого измельченного образца по 20 мг из каждой пробирки помещали в специ-

альные кварцевые пробирки ($\varnothing$: 4 мм), предназначенные для проведения спектрометрии. Пробирки с веществом опускали в полость с магнитным полем на уровне резонатора и регистрировали сигнал. На один вариант эксперимента было приготовлено по 3 образца продукта.

Условия получения спектров ЭПР: середина поля 3350 Э, диапазон поля 1000 Э, частота модуляции 100 кГц, модуляция 4 Э. Мощность СВЧ 50 мВт для молотого имбиря и молотой корицы и 10 мВт для куркумы. Коэффициент усиления 50, время снятия спектра 600 с. Построены кривые ЭПР-сигналов – интенсивности сигнала в относительных единицах. Проводили попарные сравнения сигналов опытных и контрольных образцов с использованием критерия Манна–Уитни и уровнем значимости 0,05; сравнения повторных измерений ЭПР-отклика в течение 270 сут с измерениями на 0 сут. Процент изменения интенсивности сигнала рассчитывали по уравнению:

$$\% \text{ изменения интенсивности} = [(I_0 - I) / I_0] \times 100,$$

где I_0 – интенсивность ЭПР-сигнала контрольного образца, отн. ед.; I – интенсивность ЭПР-сигнала опытного образца, отн. ед.

Расчет g-фактора. Критический параметр, который используют для определения спина электрона и характера изучаемого парамагнитного центра, в спектрометрии ЭПР – безразмерная величина, называемая g-фактором. Его определяли по формуле:

$$g\text{-фактор} = (h \times \nu) / (\beta \times B),$$

где $h=6,62606896 \times 10^{-34}$ – постоянная Планка, Дж·с; ν – СВЧ-частота X-диапазона, Гц; $\beta=9,2740 \times 10^{-24}$ – магнетон Бора, Дж/Тл; B – величина магнитного поля, Тл.

Результаты

На спектрах специй, представленных на рынках России, после обработки ^{60}Co фиксировали характерные радиационно-индуцированные ЭПР-сигналы. Спектры демонстрируют статистически значимое увеличение ЭПР-сигнала в прямой зависимости от дозы. В эксперименте фиксировали радиационно-индуцированные сигналы даже в образцах, обработанных в низких дозах – 1 кГр. ЭПР-сигналы опытных образцов были различимы между собой и отличались от контроля (рис. 1А–В). Контрольный образец специй имеет ЭПР-сигнал, но индуцированный естественным путем: под действием солнечной радиации. G-фактор, рассчитанный в точке пересечения контура производной с нулевой линией, был равен 2,0042, что свидетельствует о наличии углеродосодержащих радикалов. Близкое до третьего знака значение g-фактора (2,004) получено ранее [16] при ЭПР-идентификации факта радиационной деконтаминации таких специй, как корица, кардамон, имбирь и розмарин. По мнению ряда авторов, такое значение g-фактора

характерно для растительных продуктов, что объясняется наличием углеродосодержащих радикалов, и не зависит от факта радиационной деконтаминации [16, 17].

Результаты ЭПР-спектрометрии молотого имбиря, молотой корицы и куркумы показали, что в контроле ЭПР-сигнал имбиря был значимо выше, чем сигналы молотой корицы и куркумы (см. рис. 1А–В). Снятые спектры сразу после обработки показали, что ЭПР-сигнал молотого имбиря был значимо выше контроля при дозе 1 кГр на 87%, а при дозе 10 кГр – на 527% (см. рис. 1А). ЭПР-сигнал молотой корицы сразу после обработки дозой 1 кГр статистически значимо превышал контроль на 110%, а после обработки 10 кГр – уже на 657% (см. рис. 1Б). ЭПР-сигнал куркумы сразу после обработки статистически значимо возрастал по сравнению с контролем на 252% при 1 кГр и на 826% при 10 кГр (см. рис. 1В). ЭПР-сигнал обработанного дозой 10 кГр образца куркумы был статистически значимо самым интенсивным в эксперименте.

Оценка временной стабильности ЭПР-сигнала, которую осуществляли путем повторных измерений сигнала спустя 7, 14, 28, 90, 180 и 270 сут от момента обработки ^{60}Co , показала факт затухания сигнала. Таким образом, за время хранения ЭПР-сигнал как контроля (0 кГр), так и радиационно-обработанных образцов специй статистически значимо уменьшился относительно его значения, измеренного сразу после обработки (0 сут) (рис. 2А–В).

Интересно, что спустя 7 сут после обработки ЭПР-сигнал опытных образцов молотого имбиря оставался значимо выше контроля на 38% в дозе 1 кГр и на 191% в дозе 10 кГр; а спустя 270 сут – соответственно на 14 и 37%. При сравнении со значениями сигнала, измеренными сразу после обработки ^{60}Co , за время хранения в течение 7 сут после обработки ЭПР-сигнал статистически значимо снизился на 15% в контроле, а у опытных образцов – на 37, 48, 52, 55 и на 60% для дозы 1, 3, 5, 7 и 10 кГр соответственно. Спустя 14 сут по сравнению с измерением на 7 сут ЭПР-сигнал опытных образцов статистически значимо снизился на 21–22% для дозы 1–10 кГр. ЭПР-сигнал молотого имбиря статистически значимо снижался за время хранения в течение 270 сут на 35% в контроле, на 61, 75, 81, 81, 86% соответственно в дозах 1, 3, 5, 7 и 10 кГр относительно значений, измеренных сразу после радиационной обработки (см. рис. 2А).

Сигнал электронного парамагнитного резонанса опытных образцов молотой корицы оставался значимо выше контроля спустя 7 сут после обработки на 21% в дозе 1 кГр и на 131% в дозе 10 кГр. Спустя же 270 сут сигнал опытных образцов оставался значимо выше в дозе 10 кГр на 27,8% и в дозе 7 кГр на 13,4%, а для дозы 1 кГр сигнал был выше только на 3,2%. Интересно, что затухание ЭПР-сигнала молотой корицы происходило быстрее, чем молотого имбиря. Сравнивая со значениями сигнала сразу после обработки ^{60}Co , за время хранения в течение 7 сут ЭПР-сигнал статистически значимо снизился на 9% в контроле, а у опытных образцов на 48, 62, 70, 71 и на 72% для дозы 1, 3, 5, 7 и 10 кГр соответ-

ственно. Оценивая равномерность снижения сигнала можно отметить, что спустя 14 сут по сравнению со значениями на 7 сут ЭПР-сигнал опытных образцов значимо снижался на 9–28% для дозы 1–10 кГр. ЭПР-сигнал молотой корицы статистически значимо снизился за время хранения в течение 270 сут на 15% в контроле, на 59, 77, 82, 84, 86% соответственно в дозах 1, 3, 5, 7 и 10 кГр относительно значений, измеренных сразу после обработки ^{60}Co (см. рис. 2Б).

Сигнал электронного парамагнитного резонанса радиационно-обработанных образцов куркумы значимо превышал контроль спустя 7 сут хранения на 85% для дозы 1 кГр и на 164% для дозы 10 кГр; а спустя 270 сут – на 25% для дозы 1 кГр и на 31% для дозы 10 кГр. Следует отметить, что спустя первые 7 сут хранения ЭПР-сигнал куркумы резко затухал в сравнении с другими специями. Относительно значений сигнала, измеренного сразу после радиационной обработки (0 сут), за время хранения в течение 7 сут после обработки ЭПР-сигнал статистически значимо снизился только у опытных образцов на 47, 63, 66, 71 и на 71% для дозы 1, 3, 5, 7 и 10 кГр соответственно. Сравнивая измерения сигнала спустя 14 сут хранения и спустя 7 сут хранения, можно отметить значимое снижение ЭПР-сигнала в этот промежуток времени на 11–25% для дозы 1–10 кГр. ЭПР-сигнал куркумы статистически значимо снижался за время хранения в течение 270 сут на 15% в контроле, на 69, 83, 85, 88 и на 88% соответственно в дозах 1, 3, 5, 7 и 10 кГр относительно значений, измеренных сразу после радиационной обработки (см. рис. 2В).

Обсуждение

Спектры ЭПР специй, представленных на рынках России и выбранных для настоящего исследования, хорошо соотносятся с данными литературы и характерны для овощей и специй [7]. Известно о трудности различения обработанных и необработанных образцов из-за того, что наблюдается только одна линия спектра до и после радиационной деконтаминации. Это связано с тем, что ЭПР-сигналы, индуцированные естественным путем и индуцированные ионизирующим излучением в растительных тест-объектах, имеют одинаковый g-фактор в спектрах X- и Q-диапазонов. Это делает их неразличимыми независимо от различий источника индуцирования сигнала [7]. Таким образом, единственным отличием между обработанными и необработанными образцами растительных тест-объектов является значительное увеличение амплитуды естественной синглетной линии, т.е. только увеличение интенсивности ЭПР-сигнала относительно контроля, что может быть использовано как доказательство предшествующей радиационной деконтаминации специй и пряных трав.

Результаты нашего исследования подтверждают данные других авторов [4, 7, 16] и демонстрируют, что после радиационной деконтаминации специй происходит значимое увеличение амплитуды естественного сигнала,

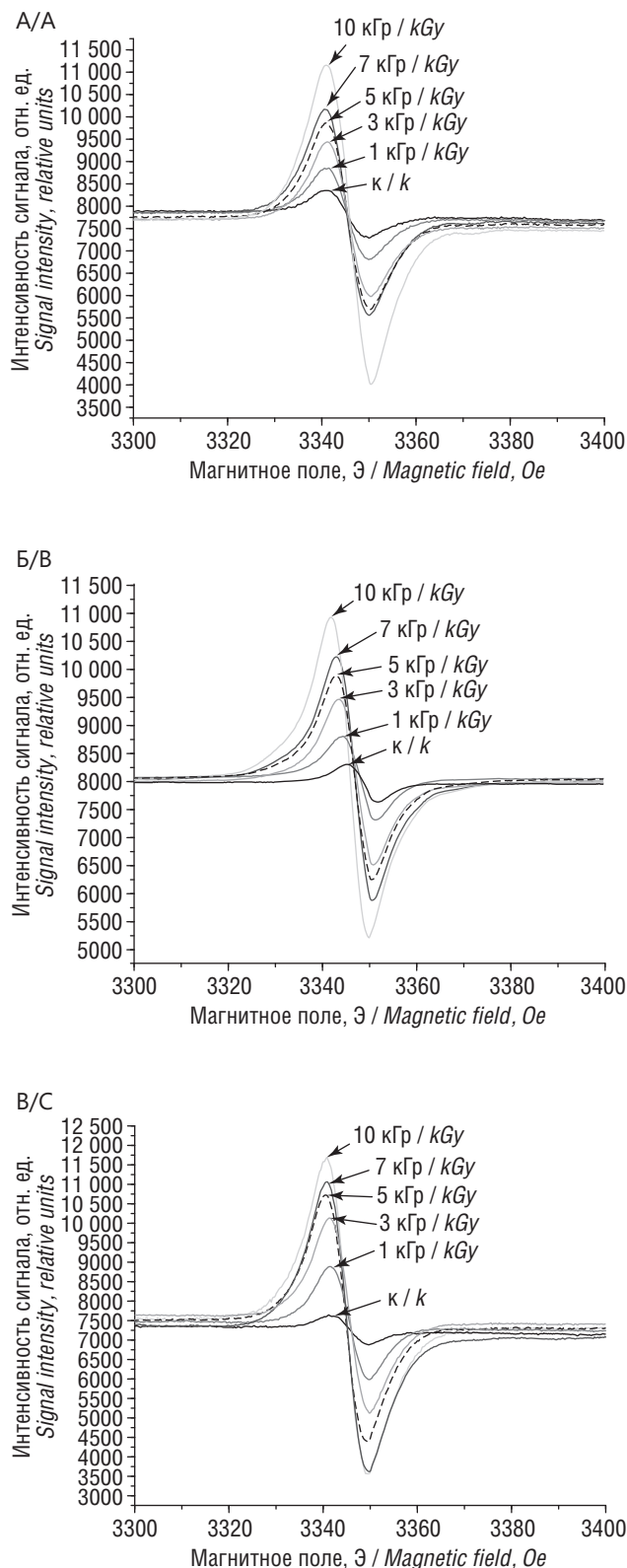
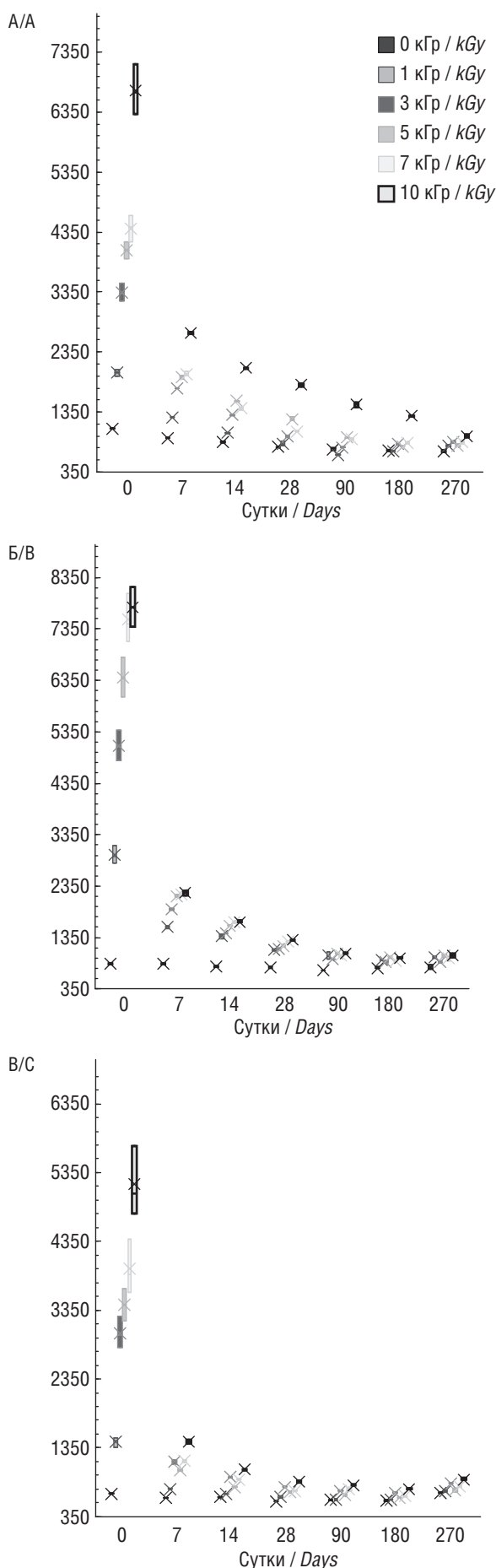


Рис. 1. Общий вид спектров электронного парамагнитного резонанса контрольных (к) и радиационно-обработанных ^{60}Co в дозах 1, 3, 5, 7 и 10 кГр образцов молотого имбиря (А), молотой корицы (Б) и куркумы (В) сразу после обработки

Fig. 1. General view of the electron paramagnetic resonance spectra of non-irradiated sample (k) and irradiated samples after ^{60}Co gamma-irradiation (1, 3, 5, 7 and 10 kGy): dry ground ginger (A); dry cinnamon (B); turmeric (C)



которое прямо пропорционально поглощенной дозе. Считается, что свободных радикалов от воздействия радиационной деkontаминации образуется немного, поскольку амплитуда сигналов, индуцированных ионизирующим излучением, медленно снижается со временем, независимо от наличия доступа воздуха, и полностью исчезает после обработки водой [7]. Результаты нашего исследования подтверждают затухание ЭПР-сигналов, индуцированных как ионизирующим излучением, так и действием солнечной радиации со временем.

Поскольку сообщается, что амплитуда сигнала ЭПР может варьировать в зависимости от влажности образца, мы в экспериментах использовали сухие специи. Одной из специй в качестве объекта исследования выбран сухой молотый имбирь (*Zingiber officinale*), суточное потребление которого согласно расчету [5] составляет 0,324 г на взрослого человека в России. Согласно результатам исследования [16] обработка имбиря дозами 5 и 10 кГр не приводит к изменению амплитуды ЭПР-сигнала, однако обработка дозой 20 кГр вызывает его изменение. Одной из возможных причин расхождения наших результатов с данными, опубликованными авторами, может быть влажность образцов. В обзорной части всех экспериментальных статей, посвященных ЭПР-спектрометрии, подчеркивается, что влажность образца является ключевым фактором, который может существенно снизить интенсивность сигнала. Авторами показано, что контрольные и обработанные при 20 кГр образцы имбиря можно различить по ЭПР-сигналам и при сроке хранения до 3 мес [16]. В нашем исследовании было показано, что затухание сигнала происходит быстро в течение первых 7 сут после обработки – от 37 до 60% в дозах от 1 до 10 кГр соответственно. Далее скорость затухания ЭПР-сигнала снижалась. В более ранней работе [18] показано, что радиационно-обработанные образцы имбиря позволяют получить типичные спектры с g -фактором 2,006, которые значительно отличаются от контроля, что согласуется с результатами нашего исследования: ЭПР-сигналы опытных образцов имбиря, обработанных в дозах 1–10 кГр, значительно отличались от таковых, полученных для контроля.

Другим объектом нашего исследования была выбрана молотая корица (*Cinnamomum verum*). Эта специя интересна тем, что в ней не обнаруживают вторичные

Рис. 2. Затухание сигнала электронного парамагнитного резонанса образцов молотого имбиря (А), молотой корицы (Б) и куркумы (В) после радиационной деkontаминации в различных дозах с течением времени при хранении при комнатной температуре

По оси ординат – интенсивность сигнала в относительных единицах.

Fig. 2. Change in relative intensity (attenuation kinetics) of the electron paramagnetic resonance (EPR) signals of non-irradiated sample (0kGy) and irradiated samples during 270 days post-irradiation storage at room temperature

On the fig. the EPR signal intensity in relative units: dry ground ginger (A), dry cinnamon (B), turmeric (C)

метаболиты аспергилла и пеницилла, что, предположительно, связано с наличием у корицы фунгицидных свойств. Отмечается перспективность использования экстрактов корицы для подавления роста мицелия аспергиллов [5]. В нашем исследовании после обработки дозами 1–10 кГр амплитуда сигнала увеличилась на 110–657% относительно контроля. Затухание ЭПР-сигнала обработанной молотой корицы было максимальным в первые 7 сут – на 48–72%. Полученные нами данные соответствуют результатам других авторов [16], отмечавших, что даже спустя 10 мес хранения можно было обнаружить сигнал образцов, обработанных дозой 20 кГр, и отличить от контрольного.

Третьей специей для исследования была выбрана куркума (*Curcuma longa*), поскольку она очень часто подвергается радиационной деконтаминации вследствие высокой эффективности такой обработки. Гамма-излучение позволяет снизить микробиологическую обсемененность куркумы на 5 логарифмов [19]. Результаты эксперимента показали, что затухание ЭПР-сигнала куркумы в течение первых 7 сут хранения от момента обработки тоже было максимальным – на 47–71%. Полученные нами данные в целом соответствуют результатам других авторов [16] для доз до 10 кГр. После 10 мес хранения образцов, обработанных дозой 20 кГр, их сигнал можно было отличить от контрольного [16]. Другие авторы также показали, что количество свободных радикалов увеличивается во всех радиационно-обработанных образцах куркумы сразу после обработки, но со временем уменьшается [19]. ЭПР-сигнал снижался в течение первых 7 сут во всех обработанных образцах и затухал до уровня контроля через 21 сут. После 21 сут хранения количество свободных радикалов во всех контрольных и обработанных образцах куркумы было одинаковым. Авторы считают, что свободные радикалы, индуцированные гамма-излучением, разрушались во время хранения и полностью исчезали через 21 сут [19]. Интересно, что содержание биологически активных соединений – куркуминоидов – в порошке куркумы тоже увеличивалось после обработки в дозах до 10 кГр [19]. Гамма-излучение ^{60}Co до 10 кГр может быть использовано для обработки куркумы, поскольку не снижает ее антиоксидантные свойства. Обработка же более высокими дозами снижает антиоксидантные свойства [20], что делает актуальным мониторинг факта радиационной деконтаминации куркумы.

Результаты нашего исследования показывают, что спустя 9 мес с момента радиационной деконтаминации в образцах оставалось достаточное количество радиационно-индуцированных радикалов, и поэтому ЭПР-спектры обработанных в дозах 1–10 кГр специй можно было отличить от контрольных. Это подтверждает возможность установления факта обработки молотой корицы, куркумы и молотого имбиря предельно допустимой дозой в течение разумного срока хранения. Анализируя собственные результаты исследования, стоит отметить, что увеличение сигнала после обработки высокими дозами не столь существенное, что может быть связано с тем, что достигнут предел возмож-

ных свободнорадикальных процессов в образце или же, другими словами, наблюдается эффект насыщения образца. Затухание сигнала, вероятно, связано с рекомбинацией радикалов – радиационно-индуцированных парамагнитных центров. Стоит отметить, что чем выше доза гамма-излучения, тем сильнее происходит затухание сигнала, так как образуется больше короткоживущих и неустойчивых радикалов по сравнению с обработкой относительно низкими дозами. Можно сделать вывод, что сухие специи подходят для ЭПР-спектрометрии и анализ ЭПР-сигналов позволяет идентифицировать факт их радиационной деконтаминации.

Отметим отдельно, что влажность образца является в определенном смысле ограничивающим фактором, потому что оказывает влияние на результаты ЭПР-спектрометрии. Повышенное содержание влаги оказывает двойное воздействие на процесс регистрации сигнала. С одной стороны, влага может способствовать частичной рекомбинации радиационно-индуцированных парамагнитных центров и, как следствие, некоторому снижению амплитуды сигнала [16, 21]. С другой стороны, высокая влажность создает техническое ограничение регистрации спектров ЭПР, связанное с поглощением микроволнового СВЧ-поля водой. Вода обладает высокой комплексной диэлектрической проницаемостью и характеризуется значительными потерями, поэтому даже при умеренном содержании влаги происходит деградация добротности резонатора, ослабление СВЧ-магнитного поля внутри образца и ухудшение согласования с волноводом. В результате снижается отношение сигнал/шум, возрастает уровень фона, а спектры становятся искаженными или плохо воспроизводимыми [22]. Таким образом, именно поглощение микроволнового излучения водой, а не химическая утрата парамагнитных центров является основным фактором, ограничивающим чувствительность ЭПР-спектрометрии при высокой влажности.

Следует отметить, что выявленное ограничение носит технический характер и не исключает возможности применения ЭПР-спектрометрии для анализа образцов. При необходимости регистрации спектров у образцов с повышенной влажностью достаточно провести предварительное высушивание до стабильного состояния, не изменяющего структуру и природу радиационно-индуцированных центров. Высушивание в данном случае не является процедурой модификации продукта, а используется исключительно для обеспечения корректной работы измерительной системы и восстановления условий, при которых сигнал может быть зарегистрирован. Такая корректировка влажности соответствует стандартной лабораторной практике и предусмотрена нормативными документами (ГОСТ Р 52529-2006, ГОСТ 31652-2012, EN 1787:2000, EN 13708:2001 и др.), регламентирующими подготовку образцов для ЭПР-анализа пищевых продуктов.

При приведении влажности образца к нормативным значениям, предусмотренным для конкретного вида продукции, условия регистрации сигнала в резонаторе стабилизируются, что позволяет достоверно регистри-

ровать ЭПР-спектры. Это демонстрирует возможность применения метода к различным видам пищевых продуктов при контролируемых параметрах влажности.

В настоящей работе измерения проводились на образцах с контролируемой массовой долей влаги около 6% без предварительной сушки образцов перед регистрацией, что обеспечивает стабильные условия для ЭПР-спектрометрии и соответствует оптимальному диапазону для воспроизводимых спектров. В этих условиях были получены отчетливые радиационно-индуцированные сигналы, позволяющие уверенно идентифицировать факт обработки.

Таким образом, влияние влажности на результаты ЭПР-анализа проявляется преимущественно через физические ограничения регистрации сигнала, вызванные поглощением микроволнового излучения водой. Для получения достоверных ЭПР-спектров рекомендуется проводить измерения при массовой доле влаги, не превышающей нормативные значения. При превышении этого уровня допускается предварительное подсушивание образца до стабильного состояния, обеспечивающего корректную работу СВЧ-резонатора, без изменения структуры и природы радиационно-индуцированных центров при соблюдении нормативных требований. Это обеспечивает оптимальные условия для надежного детектирования и корректной работы резонатора.

Заключение

Оценка ЭПР-сигналов может быть использована для установления факта радиационной деkontаминации и последующего радиационного мониторинга монокомпонентных специй, реализуемых на потребительском

рынке России. Результаты показали, что радиационно-обработанные образцы специй возможно однозначно отличить и, соответственно, отделить от контрольных. Поглощенные дозы, которыми воздействовали на специи, можно было дифференцировать по амплитуде специфичных ЭПР-сигналов. Установлено, что после обработки ^{60}Co молотого имбиря, молотой корицы и куркумы, представленных на рынках России, происходят окислительные процессы и образуются свободные радикалы, о чем свидетельствуют зарегистрированные ЭПР-сигналы. С увеличением поглощенной дозы гамма-излучения амплитуда сигнала линейно возрастает, что свидетельствует о росте концентрации парамагнитных центров в специях. G-фактор специй в точке пересечения производной линии с нулевой равен 2,0042, что свидетельствует о наличии углеродосодержащих радикалов. После обработки в дозах от 1 до 10 кГр ЭПР-сигнал статистически значимо дозозависимо возрастал по сравнению с контролем – в опытных образцах молотого имбиря на 87–527%, молотой корицы на 110–657%, куркумы на 252–826%. ЭПР-сигнал специй затухал со временем, при этом затухание сигнала было особо значительным в первые полмесяца хранения у всех исследованных специй, с последующим более медленным затуханием в течение 9 мес. Наблюдались различия в падении ЭПР-сигнала в зависимости от специи: куркума демонстрирует наиболее быстрое снижение по сравнению с молотым имбирем и молотой корицей, а имбирь показал наибольшую устойчивость сигнала за 9 мес хранения. Наибольшее статистически значимое снижение ЭПР-сигнала радиационно-обработанных образцов специй фиксировали после 7 сут хранения: молотого имбиря – на 37–60%, молотой корицы – на 48–72%, куркумы – на 47–71%.

Сведения об авторах

НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ (Обнинск, Российская Федерация):

Титова Дарья Игоревна (*Daria I. Titova*) – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории ядерно-физических исследований и технологий в сельском хозяйстве

E-mail: contactforinfo@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5790-9958>

Меджидов Ибрагим Меджидович (*Ibragim M. Medzhidov*) – аспирант, научный сотрудник лаборатории ядерно-физических исследований и технологий в сельском хозяйстве

E-mail: immedzhidov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5427-7887>

Харламов Владимир Александрович (*Vladimir A. Kharlamov*) – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории ядерно-физических исследований и технологий в сельском хозяйстве

E-mail: kharlamof@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3479-1800>

Литература

1. Кобелев К.В., Севостьянова Е.М., Харламова Л.Н., Лазарева И.В., Хомич Л.М. Определение содержания углеводов в безалкогольных напитках. Методические аспекты и результаты исследований различными методами // Вопросы питания. 2024. Т. 93, № 4. С. 112–120. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-4-112-120>
2. Тимакова Р.Т. Оценка антиоксидантной активности свежих яблок разных pomологических сортов после обработки ионизирующим излучением // Вопросы питания. 2018. Т. 87, № 3. С. 66–71. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2018-10033>

3. Feliciano C.P. High-dose irradiated food: current progress, applications, and prospects // *Radiat. Phys. Chem.* 2018. Vol. 144. P. 34–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.11.010>
4. Oliveira M.M., Cruz-Tirado J.P., Barbin D.F. Nontargeted analytical methods as a powerful tool for the authentication of spices and herbs: a review // *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2019. Vol. 18, N 3. P. 670–689. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12436>
5. Чалый З.А., Киселева М.Г., Седова И.Б., Тутельян В.А. Микотоксины в специях, потребляемых в России // *Вопросы питания.* 2023. Т. 92, № 2. С. 26–34. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-2-26-34>
6. Kuvykina M., Pryadka A., Tenishev V., Gorskiy A., Aprelev A. Application of the electronic paramagnetic resonance method for detecting radiation-processed food products // *J. Phys. Conf. Ser.* 2022. Vol. 2192. Article ID 012023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2192/1/012023>
7. Aleksieva K.I., Yordanov N.D. Various approaches in EPR identification of gamma-irradiated plant foodstuffs: a review // *Food Res. Int.* 2018. Vol. 105. P. 1019–1028. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.072>
8. Русаков В.Н., Есаулова О.В. Актуальные проблемы радиационного облучения пищевой продукции в Российской Федерации // *Вопросы питания.* 2023. Т. 92, № S5. С. 215–216. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-5s-266>
9. Тимакова Р.Т., Романова А.С., Курдюмов А.В., Тарарков А.Н. Оценка радиационной безопасности пищевых продуктов методом парамагнитного резонанса // *Агропродовольственная политика России.* 2016. № 9 (60). С. 83–88.
10. Горбачев Д.О. Оценка радиационного риска здоровью, обусловленного поступлением радионуклидов Cs-137 и Sr-90 с пищевыми продуктами, у трудоспособного населения Самарской области // *Вопросы питания.* 2024. Т. 93, № 4. С. 58–64. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-4-58-64>
11. Guzik G.P., Michalik J. European inter-comparison studies as a tool for perfecting irradiated food detection methods // *Nukleonika.* 2021. Vol. 66, N 3. P. 91–97. DOI: <https://doi.org/10.2478/nuka-2021-0013>
12. Меджидов И.М., Полякова И.В., Горбатов С.А., Петрухина Д.И., Шишко В.И., Тхорик О.В. и др. ЭПР-исследование кинетики распада свободных радикалов облученной сахарозы // *Вестник Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки.* 2023. № 4 (109). С. 141–158. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-4-141-158>
13. Фролова Ю.В., Кочеткова А.А. Применение метода электронного парамагнитного резонанса для оценки антиоксидантной активности растительного сырья // *Вопросы питания.* 2023. Т. 92, № S5. С. 203–204. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-5s-250>
14. Русаков В.Н. Использование методов липидомики для идентификации радиационно облученного мяса // *Вопросы питания.* 2023. Т. 92, № S5. С. 215. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-5s-265>
15. Jeong S.G., Yang J.E., Park J.H., Ko S.H., Choi I.S., Kim H.M. et al. Gamma irradiation improves the microbiological safety and shelf-life of kimchi seasoning mixture // *LWT.* 2020. Vol. 134. Article ID 110144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110144>
16. Khan A.A., Shahid M.K. Detection of radiation treatment of spices using Electron Spin Resonance Spectroscopy technique // *JOSAC (Journal of Spices and Aromatic Crops).* 2021. Vol. 30, N 1. P. 107–116. DOI: <https://doi.org/10.25081/josac.2021.v30.i1.6855>
17. Baek M.E., Ameer K., Jo Y., Chung N., Choi M., Kim J.O. et al. Microbial assessment of medicinal herbs (Cnidii Rhizoma and Alismatis Rhizoma), effects of electron beam irradiation and detection characteristics // *Food Sci. Biotechnol.* 2020. Vol. 29. P. 705–715. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00701-w>
18. Choi I.D., Byun M.W., Kwon J.H., Kim D.H. An application of photo-stimulated luminescence (PSL) and electron spin resonance (ESR) analysis for the irradiated spicy vegetables // *Food Sci. Biotechnol.* 2004. Vol. 13, N 5. P. 646–650.
19. Aghamohseni Z., Esmaceli S., Ardestani S.B., Akbari M.E., Moslehi A., Khanniri E. et al. Effects of gamma and electron-beam irradiations on the stability of free radicals, bioactive compounds and microbial characteristics of turmeric powder // *Radiat. Phys. Chem.* 2025. Vol. 227. Article ID 112368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112368>
20. Almeida M.C., Sampaio G.R., Bastos D.H.M., Villavicencio A.L.C.H. Effect of gamma radiation processing on turmeric: antioxidant activity and curcumin content // *Radiat. Phys. Chem.* 2018. Vol. 152. P. 12–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.07.008>
21. Stachowicz W., Burlinska G., Michalik J. EPR detection of foods preserved with ionizing radiation // *Radiat. Phys. Chem.* 1998. Vol. 52, N 1-6. P. 157–160. DOI: <https://doi.org/10.1016/S0969-806X%2898%2900066-8>
22. Nesmelov Y.E., Gopinath A., Thomas D.D. Aqueous sample in an EPR cavity: sensitivity considerations // *J. Magn. Reson.* 2004. Vol. 167, N 1. P. 138–146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2003.12.005>

References

1. Kobelev K.V., Sevost'yanova E.M., Kharlamova L.N., Lazareva I.V., Khomich L.M. Determination of carbohydrate content in soft drinks. Methodological aspects and results of research using various methods. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2024; 93 (4): 112–20. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-4-112-120> (in Russian)
2. Timakova R.T. Evaluation of antioxidant activity of fresh apples different pomological varieties after treatment with ionizing radiation. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2018; 87 (3): 66–71. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2018-10033> (in Russian)
3. Feliciano C.P. High-dose irradiated food: current progress, applications, and prospects. *Radiat Phys Chem.* 2018; 144: 34–6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.11.010>
4. Oliveira M.M., Cruz-Tirado J.P., Barbin D.F. Nontargeted analytical methods as a powerful tool for the authentication of spices and herbs: a review. *Compr Rev Food Sci Food Saf.* 2019; 18 (3): 670–89. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12436>
5. Chaly Z.A., Kiseleva M.G., Sedova I.B., Tutel'yan V.A. Mycotoxins in spices consumed in Russia. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2023; 92 (2): 26–34. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-2-26-34> (in Russian)
6. Kuvykina M., Pryadka A., Tenishev V., Gorskiy A., Aprelev A. Application of the electronic paramagnetic resonance method for detecting radiation-processed food products. *J Phys Conf Ser.* 2022; 2192: 012023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2192/1/012023>
7. Aleksieva K.I., Yordanov N.D. Various approaches in EPR identification of gamma-irradiated plant foodstuffs: a review. *Food Res Int.* 2018; 105: 1019–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.072>
8. Rusakov V.N., Yesaulova O.V. Current issues of radiation exposure of food products in the Russian Federation. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2023; 92 (S5): 215–6. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-5s-266> (in Russian)
9. Timakova R.T., Romanova A.S., Kurdyumov A.V., Tararkov A.N. Assessment of radiation safety of food products by paramagnetic resonance method. *Agroprodovol'stvennaya politika Rossii [Agro-Food Policy of Russia]*. 2016; 9 (60): 83–8. (in Russian)
10. Gorbachev D.O. Assessment of the radiation risk to health caused by the intake of Cs-137 and Sr-90 radionuclides from food in the able-bodied population of the Samara region. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2024; 93 (4): 58–64. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-4-58-64> (in Russian)
11. Guzik G.P., Michalik J. European inter-comparison studies as a tool for perfecting irradiated food detection methods. *Nukleonika.* 2021; 66 (3): 91–7. DOI: <https://doi.org/10.2478/nuka-2021-0013>
12. Medzhidov I.M., Polyakova I.V., Gorbатов S.A., Petrukhina D.I., Shishko V.I., Tkhorik O.V., et al. EPR-study the decay kinetics of free radicals in irradiated sucrose. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Bauman. Seriya Estestvennye nauki [Bulletin of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Series: Natural Sciences]*. 2023; 4 (109): 141–58. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-4-141-158> (in Russian)
13. Frolova Yu.V., Kochetkova A.A. Application of the electron paramagnetic resonance method for assessing the antioxidant activity of plant materials. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2023; 92 (S5): 203–204. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-5s-250> (in Russian)
14. Rusakov V.N. Using lipidomics methods to identify radiation-exposed meat. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2023; 92 (S5): 215. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-5s-265> (in Russian)
15. Jeong S.G., Yang J.E., Park J.H., Ko S.H., Choi I.S., Kim H.M., et al. Gamma irradiation improves the microbiological safety and shelf-life

- of kimchi seasoning mixture. *LWT*. 2020; 134: 110144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110144>
16. Khan A.A., Shahid M.K. Detection of radiation treatment of spices using Electron Spin Resonance Spectroscopy technique. *JOSAC (Journal of Spices and Aromatic Crops)*. 2021; 30 (1): 107–16. DOI: <https://doi.org/10.25081/josac.2021.v30.i1.6855>
17. Baek M.E., Ameer K., Jo Y., Chung N., Choi M., Kim J.O., et al. Microbial assessment of medicinal herbs (*Cnidii Rhizoma* and *Alismatis Rhizoma*), effects of electron beam irradiation and detection characteristics. *Food Sci Biotechnol*. 2020; 29: 705–15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00701-w>
18. Choi I.D., Byun M.W., Kwon J.H., Kim D.H. An application of photo-stimulated luminescence (PSL) and electron spin resonance (ESR) analysis for the irradiated spicy vegetables. *Food Sci Biotechnol*. 2004; 13 (5): 646–50.
19. Aghamohseni Z., Esmaceli S., Ardestani S.B., Akbari M.E., Moslehi A., Khanniri E., et al. Effects of gamma and electron-beam irradiations on the stability of free radicals, bioactive compounds and microbial characteristics of turmeric powder. *Radiat Phys Chem*. 2025; 227: 112368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112368>
20. Almeida M.C., Sampaio G.R., Bastos D.H.M., Villavicencio A.L.C.H. Effect of gamma radiation processing on turmeric: antioxidant activity and curcumin content. *Radiat Phys Chem*. 2018; 152: 12–6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.07.008>
21. Stachowicz W., Burlinska G., Michalik J. EPR detection of foods preserved with ionizing radiation. *Radiat Phys Chem*. 1998; 52 (1-6): 157–60. DOI: <https://doi.org/10.1016/S0969-806X%2898%2900066-8>
22. Nesmelov Y.E., Gopinath A., Thomas D.D. Aqueous sample in an EPR cavity: sensitivity considerations. *J Magn Reson*. 2004; 167 (1): 138–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2003.12.005>

Для корреспонденции

Смирнова Елена Александровна – кандидат технических наук, заведующий лабораторией демографии и эпидемиологии питания ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»
 Адрес: 109240, Российская Федерация, г. Москва, Устьинский проезд, д. 2/14
 Телефон: (495) 698-53-87
 E-mail: smirnova@ion.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2045-5729>

Смирнова Е.А., Бессонов В.В., Шахвалиева Э.С.-А., Щербаков Г.Д., Кешабянц Э.Э., Андропова М.С., Тутельян В.А.

К вопросу о цифровизации химического состава пищевой продукции

On digitalizing the analysis of food chemistry composition data

Smirnova E.A., Bessonov V.V., Shakhvalieva E.S.-A., Shcherbakov G.D., Keshabyants E.E., Andronova M.S., Tutelyan V.A.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, 109240, г. Москва, Российская Федерация

Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, 109240, Moscow, Russian Federation

Развитие цифровой нутрициологии, основанной на применении алгоритмов искусственного интеллекта для персонализации рекомендаций по питанию, сдерживается отсутствием в Российской Федерации единой верифицированной базы данных химического состава пищевых продуктов. Такой ресурс должен репрезентативно отражать современное состояние агропромышленного комплекса и включать продукты, составляющие основу рациона различных демографических групп населения.

Цель исследования – разработка программно-аналитического комплекса для создания и верификации национальной базы данных химического состава пищевых продуктов. Создаваемая система будет обеспечивать консолидацию данных из разнородных источников о продовольственном сырье, продукции промышленного производства и кулинарных изделиях, формируя репрезентативный ресурс, отражающий структуру фактического питания населения и актуальный ассортимент продукции.

Материал и методы. Для разработки программно-аналитического комплекса с трехуровневой архитектурой (MySQL 8.0, Python 3.13.3/Flask 2.0, HTML5/

Финансирование. Исследование выполнено в рамках реализации соглашения с РНФ 23-16-00242, <https://rscf.ru/project/23-16-00242/>

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликтов интересов.

Вклад авторов. Концепция и дизайн исследования – Тутельян В.А., Бессонов В.В., Смирнова Е.А.; обработка материала и анализ полученных данных – Шахвалиева Э.С.-А., Кешабянц Э.Э., Щербаков Г.Д., Андропова М.С.; подготовка рукописи – Смирнова Е.А., Шахвалиева Э.С.-А.; редактирование, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи – все авторы.

Для цитирования: Смирнова Е.А., Бессонов В.В., Шахвалиева Э.С.-А., Щербаков Г.Д., Кешабянц Э.Э., Андропова М.С., Тутельян В.А. К вопросу о цифровизации химического состава пищевой продукции // Вопросы питания. 2025. Т. 94, № 6. С. 69–79. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-69-79>

Статья поступила в редакцию 28.10.2025. **Принята в печать** 17.11.2025.

Funding. The study was conducted under agreement 23-16-00242 with the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/23-16-00242/>

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Contribution. Study concept and design – Tutelyan V.A., Bessonov V.V., Smirnova E.A.; material processing and data analysis – Shakhvalieva E.S.-A., Keshabyants E.E., Shcherbakov G.D., Andronova M.S.; manuscript writing – Smirnova E.A., Shakhvalieva E.S.-A. All authors have read the results of the work and approved the final version of the manuscript.

For citation: Smirnova E.A., Bessonov V.V., Shakhvalieva E.S.-A., Shcherbakov G.D., Keshabyants E.E., Andronova M.S., Tutelyan V.A. On digitalizing the analysis of food chemistry composition data. *Voprosy pitaniia* [Problems of Nutrition]. 2025; 94 (6): 69–79. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-69-79> (in Russian)

Received 28.10.2024. **Accepted** 17.11.2025.

CSS3/JavaScript) использованы и отработаны следующие подходы: сбор данных (веб-интерфейс, REST API), верификация (алгоритмы обработки пропущенных значений, выявления выбросов, кластеризация *k*-средних) и алгоритмизация расчета пищевой ценности продуктов и блюд (в том числе учет технологических потерь). Валидация проведена на основе ретроспективных данных эпидемиологических исследований питания.

Результаты. Создан программно-аналитический комплекс, включающий 3 взаимосвязанные базы данных: химического состава продовольственного сырья и пищевой продукции промышленного производства, блюд и кулинарных изделий, а также коэффициентов потерь при технологической обработке. Разработаны и реализованы алгоритмы верификации данных, включая методы обработки пропущенных значений, выявления статистических выбросов и кластеризации. Сформирован модуль расчета пищевой ценности готовых блюд с учетом технологических потерь. Предложены критерии отнесения данных к категории верифицированных, включающие требования к полноте заполнения ($\geq 95\%$), соответствию допустимым диапазонам значений и согласованности с референсными значениями. Созданы инструменты расчета пищевой ценности готовых блюд с учетом технологических потерь, включая методологию отбора рецептов с учетом региональных особенностей питания.

Заключение. Разработанный программно-аналитический комплекс с веб-интерфейсом предназначен для управления данными о химическом составе пищевых продуктов. Система комплекса поддерживает полный цикл работы с данными. Дальнейшее развитие предполагает расширение перечня анализируемых нутриентов и интеграцию с программным обеспечением различного назначения, в том числе для врачей-диетологов, специалистов в области общественного питания, расчетов рационов для организованных коллективов, а также приложений для индивидуальной оценки питания и информирования населения об энергетической и пищевой ценности рационов. Реализация проекта обеспечит доказательную основу для эпидемиологических исследований, разработки мер профилактики алиментарно-зависимых заболеваний и формирования научно обоснованной государственной политики в области здорового питания.

Ключевые слова: эпидемиология питания; база данных химического состава пищевых продуктов; нутриентный состав; оценка потребления; цифровая нутрициология; система управления данными

The development of digital nutrition science, based on the application of artificial intelligence algorithms for the personalization of dietary recommendations, is hindered in the Russian Federation by the absence of a unified verified database of the chemical composition of foods. Such a resource should representatively reflect the current state of the agro-industrial complex and include products that form the basis of the diet of various demographic groups of the population.

The objective of the research was to develop a software-analytical complex for creating and verifying a national database of the chemical composition of food. The system being created will ensure the consolidation of data from heterogeneous sources on food raw materials, industrially produced products, and culinary dishes, forming a representative resource that reflects the structure of the actual nutrition of the population and the current product range.

Material and methods. The development of a three-tier software-analytical complex (MySQL 8.0, Python 3.13.3/Flask 2.0, HTML5/CSS3/JavaScript) involved the implementation and refinement of the following approaches: data collection (via web interface and REST API), data verification (using algorithms for missing value imputation, outlier detection, and *k*-means clustering), and the creation of algorithms to calculate the nutritional value of foods and dishes, accounting for technological losses. The system was validated against retrospective data from nutritional epidemiology studies.

Results. A software-analytical complex has been created, including three interconnected databases: the chemical composition of food raw materials and industrially produced foods, dishes and culinary products, as well as coefficients of losses during technological processing. Data verification algorithms were developed and implemented, including methods for processing missing values, detecting statistical outliers, and clustering. A module for calculating the nutritional value of ready-made dishes, taking into account technological losses, was created. Criteria for classifying data as verified were developed, including requirements for completeness of filling ($\geq 95\%$), compliance with permissible value ranges, and consistency with reference values. Tools for calculating the nutritional value of ready-made dishes, taking into account technological losses, were created, including a methodology for selecting recipes considering regional dietary characteristics.

Conclusion. *The developed software-analytical complex with a web interface is designed for managing data on the chemical composition of food. The system supports the full data lifecycle. Further development of the complex involves expanding the list of analyzed nutrients and integration with software for various purposes, including for dietitians, public catering specialists, diet calculations for organized groups, as well as applications for individual nutrition assessment and informing the population about the energy and nutritional value of diets. The implementation of the project will provide an evidence base for epidemiological research, the development of preventive measures for diet-related diseases, and the formation of a scientifically based state policy in the field of healthy nutrition.*

Keywords: *nutritional epidemiology; food chemical composition database; nutrient composition; intake assessment; digital nutrition science; data management system*

Современная наука о питании переживает трансформацию, движимую цифровизацией. Область знаний «цифровой нутрициологии» базируется на интеграции информационных технологий и сложных алгоритмов для преобразования данных о физиологических потребностях, химическом составе пищи и индивидуальных особенностях питания населения в персонализированные рекомендации по питанию [1–4]. Однако разработка надежных алгоритмов критически зависит от качества и репрезентативности исходных данных.

Краеугольным камнем объективной оценки питания служит точное описание и идентификация потребляемых пищевых продуктов с использованием стандартизированных баз данных химического состава (БДХС) [5, 6]. Эти базы данных играют важную роль в эпидемиологии питания. Они необходимы для анализа пищевого статуса населения, выявления дефицита эссенциальных нутриентов и определения основных пищевых источников избыточного потребления критически значимых для здоровья пищевых веществ, таких как добавленные сахара, соль (натрий), жир, насыщенные жиры и транс-изомеры жирных кислот [7–10]. Подобный ресурс должен адекватно отражать современные агропромышленные и пищевые технологии, а также включать продукты и кулинарные изделия, формирующие основу калорийности рационов различных возрастно-половых групп населения с учетом региональных и этнокультурных особенностей [11–14].

БДХС формируют доказательную основу для разработки рекомендаций по здоровому питанию, мер профилактики хронических неинфекционных заболеваний и таких инструментов политики в области питания, как установление норм физиологических потребностей, разработка рациональных норм (размеров) потребления основных групп пищевых продуктов и внедрение расширенной маркировки пищевой ценности, что в совокупности составляет основу государственной стратегии в области здорового питания населения.

В настоящее время в Российской Федерации отсутствует единая федеральная платформа, отвечающая этим требованиям. Этот пробел в исследовательской инфраструктуре ограничивает возможности для точного анализа данных эпидемиологических исследований питания.

В то же время значительный массив новых данных о содержании нутриентов и биологически активных веществ в пищевой продукции был накоплен в резуль-

тате многолетних исследовательских программ, в том числе выполняемых Роспотребнадзором, ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» и другими научными учреждениями. Эти данные остро нуждаются в консолидации, стандартизации и верификации с использованием специализированного программно-аналитического комплекса.

Ключевым вызовом для популяционных исследований остается интеграция данных о домашнем питании. Разработка инструментов для сбора и валидации информации о составе и пищевой ценности блюд домашнего приготовления, включая традиционные и национальные, является необходимым условием для повышения точности оценки питания на уровне домохозяйств.

Цель данного исследования – разработка программно-аналитического комплекса с веб-интерфейсом для интеграции, обработки, хранения и верификации данных о химическом составе пищевых продуктов из разнородных источников. Создание данного комплекса направлено на решение ключевой научной задачи – формирование актуальной и верифицированной электронной базы данных, включающей сведения о химическом составе продовольственного сырья, пищевых продуктов промышленного производства, а также готовых блюд и кулинарных изделий, позволяющей репрезентативно отражать современное состояние агропромышленного комплекса и пищевых технологий, а также сложившуюся структуру питания населения.

Материал и методы

Для разработки программно-аналитического комплекса применяли методы системного анализа и программной инженерии. Архитектура системы построена по трехуровневой схеме, включающей базу данных (MySQL 8.0), сервер приложений (Python 3.13.3, Flask 2.0) и клиентский интерфейс (HTML5/CSS3/JavaScript).

Для обеспечения качества данных были установлены строгие критерии верификации, включающие требования к полноте заполнения данных ($\geq 95\%$), соответствию допустимым диапазонам значений, отсутствию статистических аномалий и согласованности с референсными значениями.

Статистический анализ проводили с использованием методов описательной статистики и кластерного анализа с использованием SPSS v.20.0 и Python 3.13.3.

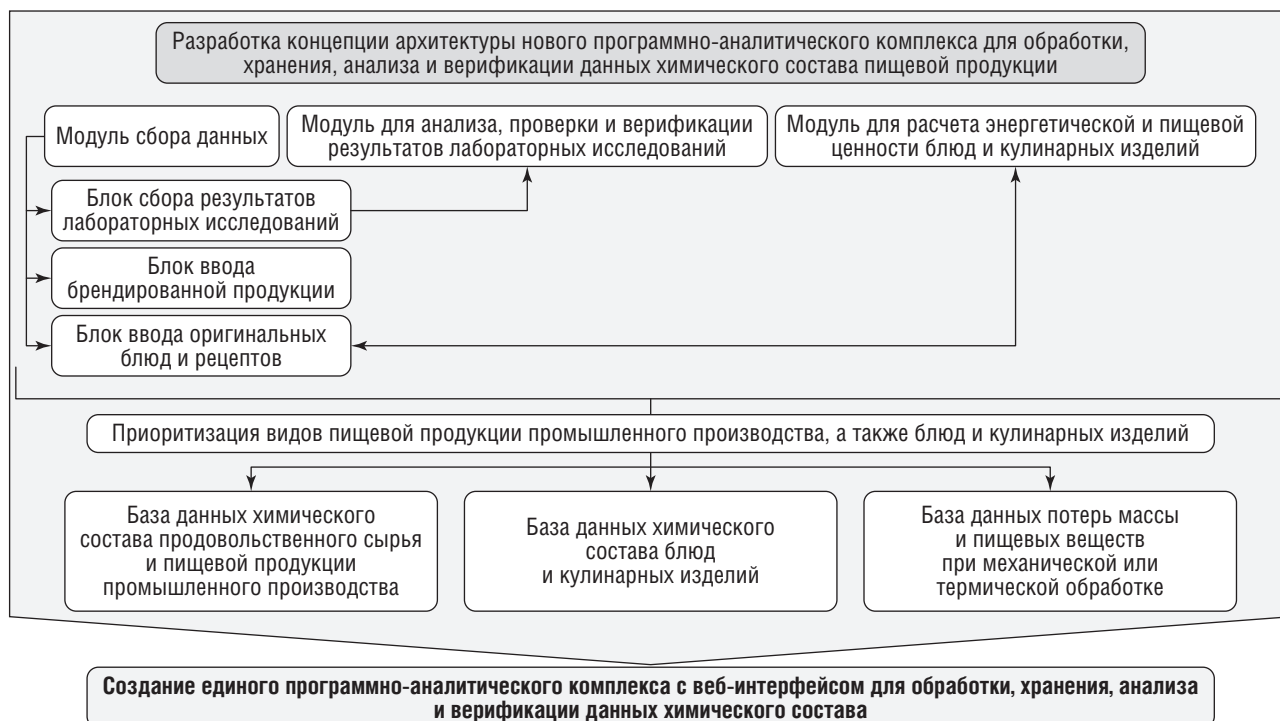


Рис. 1. Концепция программно-аналитического комплекса для обработки, хранения, анализа и верификации данных химического состава пищевой продукции

Fig. 1. Conceptual framework of the software-analytical platform for food composition data processing, storage, analysis and verification

Валидация системы осуществлена на основе ретроспективных данных крупных эпидемиологических исследований «Выборочное наблюдение рационов питания населения Российской Федерации», выполненных Росстатом в 2018 и 2023 гг. (индивидуальные данные о питании, полученные методом 24-часового воспроизведения питания, общее число обследованных детей и взрослых составило 100 599 и 89 357 человек соответственно), а также на собственных данных ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», полученных в многоцентровом исследовании «Российский эпидемиологический мониторинг питания взрослого населения» в 2024 г. (385 взрослых) и 2025 г. (130 взрослых).

Результаты

Разработка архитектуры программно-аналитического комплекса для обработки, хранения, анализа и верификации данных химического состава пищевой продукции

Решение поставленной задачи потребовало создания ИТ-инфраструктуры для управления сложными массивами данных о химическом составе пищевой продукции. В рамках данного исследования представлена методология разработки программно-аналитического комплекса, направленного на решение ключевых проблем в исследовательской инфраструктуре через многоэтапный подход.

На первом этапе была создана концепция программного комплекса (рис. 1), включающая:

- проектирование системной архитектуры со стандартизированными классификаторами и кодификаторами пищевой продукции и блюд;
- разработку взаимосвязанных модулей для сбора данных, включая результаты лабораторных (аналитических) исследований, а также рецептов блюд и кулинарных изделий и их многоуровневой верификации;
- создание математических алгоритмов и критериев принятия решений для оценки качества данных и их интеграции в единую базу данных.

Второй этап был направлен на создание содержательного наполнения и реализацию аналитических функций:

- выявление приоритетных категорий пищевой продукции и блюд на основе их вклада в калорийность рациона населения, а также в поступление макро- и микронутриентов;
- внедрение расчетных алгоритмов для оценки пищевой ценности с возможностью обработки пользовательских рецептов;
- разработку компенсационных механизмов для учета потерь массы и пищевых веществ при обработке продовольственного сырья и приготовлении пищи.

Финальная фаза интеграции объединяет все компоненты в единую веб-платформу, включающую 3 специализированные базы данных: химического состава продовольственного сырья и пищевых продуктов промышленного производства, кулинарных изделий и коэффициенты потерь. Система содержит модульные

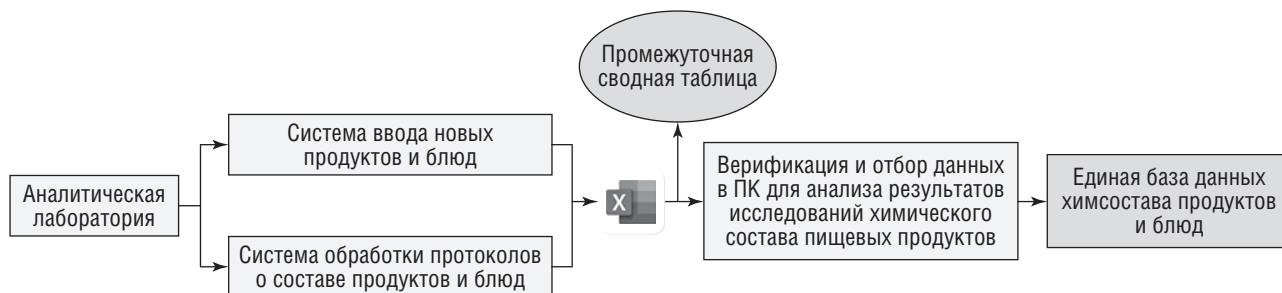


Рис. 2. Принципиальная схема модуля ввода новых данных, полученных в результате лабораторных исследований химического состава пищевой продукции

Fig. 2. Schematic diagram of the data entry module for new data obtained from laboratory studies of food chemical composition

интерфейсы ввода и протоколы верификации, поддерживающие полный жизненный цикл данных, – от сбора и валидации до анализа и хранения.

Модуль 1. Программный комплекс для сбора данных химического состава пищевых продуктов

В рамках решения задачи первичного накопления структурированных данных был разработан специализированный программный комплекс [15], обеспечивающий многоуровневый сбор информации о химическом составе пищевой продукции. Архитектура комплекса построена на принципах микросервисной организации, что позволяет обеспечить модульность, масштабируемость и отказоустойчивость системы.

Модуль ввода предназначен для регистрации обезличенных типовых данных, включая возможность ручного ввода результатов аналитических (лабораторных) исследований и обработку первичных протоколов. Параллельно функционирует модуль ввода брендированной продукции, ориентированный на работу с декларируемой производителем информацией. Для интеграции с внешними источниками предусмотрен модуль получения данных, осуществляющий взаимодействие со сторонними базами через программные интерфейсы REST API. Принципиальная схема модуля представлена на рис. 2.

Для практической реализации сбора данных разработан веб-интерфейс, позволяющий осуществлять ввод информации о пищевой ценности продукции. Интерфейс предусматривает выбор категории из иерархического классификатора, включающего 16 основных групп пищевой продукции, и последующее указание спектра показателей, включая энергетическую ценность, содержание макронутриентов, а также витаминов и минеральных веществ. Введенные данные сохраняются в структурированном формате, пригодном для последующего анализа и интеграции с другими компонентами программного комплекса.

В модуле реализована возможность выгрузки данных в формате баз данных, в том числе Microsoft Excel.

Модуль 2. Алгоритмы анализа и нормализации данных лабораторных исследований

Следующим критически важным этапом цифровизации является обеспечение качества и сопоставимости данных, получаемых из разнородных источников. Для решения этой задачи была разработана специализированная методика анализа и нормализации результатов лабораторных исследований, реализованная в виде веб-приложения на платформе R Shiny [16].

Методика включает 4 последовательных этапа обработки (рис. 3). Первоначальный этап анализа пропущенных значений направлен на идентификацию и обработку неполных данных. В условиях, когда различные лаборатории определяют неполный перечень показателей, применяется комбинированный подход: при незначительном количестве пропусков может осуществляться удаление соответствующих записей, тогда как при существенной доле пропущенных значений может быть использована импутация медианными значениями. Это позволяет минимизировать систематические смещения, неизбежно возникающие при искусственном восстановлении данных. Выбор комбинированного подхода (удаление записей при малом количестве пропусков и импутация медианными значениями при значительном) был сделан на основе сравнительного анализа методов [17–20], который показал, что для результатов лабораторных исследований, где пропуски часто носят случайный характер, медианная импутация обеспечивает достаточную устойчивость и минимизирует смещение по сравнению с более сложными методами в условиях большой размерности данных. Такая функция может быть эффективно использована при обработке больших массивов информации, получаемых в ходе крупномасштабных мониторинговых исследований качества пищевой продукции, в том числе выполняемых Роспотребнадзором¹. При этом сохраняется возможность накопления неполных данных для последующего обобщения, анализа и принятия решения о включении их в базу.

¹ МР 2.3.7.0261-21 Рекомендации по алгоритму оценки достоверности и порядку анализа результатов мониторинговых исследований показателей качества отечественной продукции, способствующей устранению дефицита макро- и микронутриентов. Утверждены руководителем Роспотребнадзора, Главным государственным санитарным врачом А.Ю. Поповой 12.10.2021.

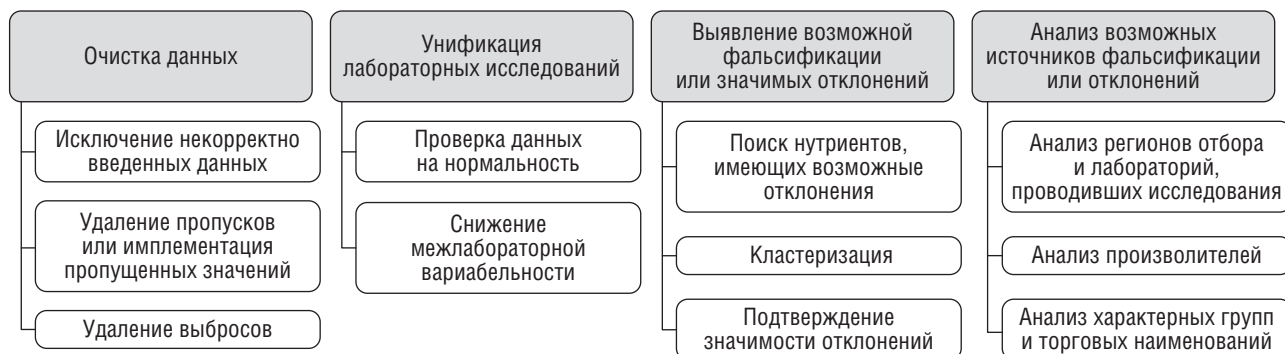


Рис. 3. Алгоритм последовательных этапов обработки данных лабораторных исследований химического состава пищевой продукции

Fig. 3. Algorithm of sequential stages for processing laboratory research data on food chemical composition

На этапе анализа выпадающих значений применяется правило 3 сигм, основанное на предположении о нормальном распределении содержания пищевых веществ в продуктах. Данное допущение подтверждается многочисленными научными исследованиями и является статистически обоснованным для большинства нутриентов. Несмотря на существование более робастных методов (например, на основе межквартильного размаха), правило 3 сигм было выбрано ввиду его простоты, интерпретируемости и подтвержденной эффективности для идентификации грубых ошибок в данных, распределение которых близко к нормальному [21]. Это особенно важно на начальном этапе очистки больших массивов данных, поступающих из множества источников. Выявление и последующее исключение статистических выбросов позволяет минимизировать влияние грубых ошибок измерения и некорректного ввода данных на итоговые результаты.

Особую роль играет модуль проверки данных, выполняющий функции контроля качества и достоверности поступающей информации. Данный модуль реализует алгоритмы оценки статистической значимости изменений, проверки корректности классификации продуктов и выявления дублирования записей. Все полученные и верифицированные сведения аккумулируются в централизованной БДХС, которая выступает в качестве единого хранилища знаний. Доступ к информации для различных категорий пользователей обеспечивается через гибкий пользовательский интерфейс, поддерживающий различные уровни детализации и аналитической агрегации.

Центральным элементом методики является этап кластеризации данных алгоритмом k -средних, направленный на выявление скрытых структур распределения показателей качества. Кластеризация осуществляется не по формальным признакам (торговое наименование, сортность), а на основе фактических значений химических показателей, что позволяет формировать статистически однородные группы продуктов для последующего анализа. Алгоритм k -средних был выбран для кластеризации после оценки альтернативных мето-

дов [иерархическая кластеризация, алгоритм плотностной кластеризации, устойчивый к шуму (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN)] на репрезентативных тестовых наборах данных. Сравнительный анализ показал, что k -средний демонстрирует наилучшее соотношение вычислительной эффективности, масштабируемости для больших объемов данных и интерпретируемости результатов [22–24]. В отличие от DBSCAN, он не требует задания параметра плотности, что затруднительно для разнородных по своей природе пищевых продуктов, а по сравнению с иерархической кластеризацией обладает значительно более высокой производительностью.

Завершающим этапом выступает нормализация данных, предназначенная для уменьшения влияния внутри- и межлабораторной variability. Методология основана на преобразовании исходных значений показателей с использованием перцентильного подхода, где в качестве референсных значений используются 20-й и 80-й перцентили распределения. Это позволяет нивелировать систематические погрешности, связанные с использованием различного аналитического оборудования и разным уровнем квалификации персонала лабораторий, обеспечивая сопоставимость данных из разных источников. Использование 20-го и 80-го перцентилей в качестве референсных точек вместо более традиционных минимума/максимума или стандартных оценок (z -score) было обосновано необходимостью создания робастного метода, устойчивого к влиянию остаточных выбросов, которые могли не быть отфильтрованы на предыдущих этапах. Данный подход, известный как робастная стандартизация, широко рекомендуется в литературе [25, 26] для задач, где требуется снизить влияние экстремальных значений на итоговую шкалу.

Модуль 3. Модуль расчета энергетической ценности и химического состава блюд и кулинарных изделий

В рамках исследования разработан специализированный модуль для расчета энергетической ценности

и химического состава кулинарных изделий на основе рецептов с учетом коэффициентов потерь при технологической обработке. Функциональные возможности модуля включают:

- ввод номенклатуры кулинарного изделия;
- формирование рецептуры с указанием ингредиентного состава и массы компонентов;
- выбор способа кулинарной обработки из систематизированной базы технологических процессов;
- автоматический расчет пищевой и энергетической ценности на 100 г готового продукта.

Алгоритм расчета реализует корректировку исходного химического состава сырьевых компонентов с применением коэффициентов потерь пищевых веществ в зависимости от выбранного способа тепловой или механической обработки. В тестовой версии модуль обеспечивает расчет основных нутриентов (белки, жиры, углеводы) и энергетической ценности, с перспективой расширения перечня рассчитываемых показателей за счет включения микронутриентов и биологически активных соединений.

В программный код были заложены следующие принципы и формулы:

1. Поиск введенного ингредиента по базе данных продовольственного сырья и пищевой продукции промышленного производства.
2. Поиск коэффициента потерь для каждого ингредиента в зависимости от вида кулинарной обработки в соответствующей базе данных (К).
3. Расчет количества каждого нутриента для ингредиентов (на примере энергии):

$$\text{Энергия (ккал)} = \text{Ккал на 100 граммов} \times \text{Масса в граммах} / 100.$$

4. Расчет общего содержания нутриента для рецепта (на примере энергии):

$$\text{Энергия (ккал)} = \Sigma \text{Общая энергия (ккал)} / \text{Общая масса в граммах} \times 100.$$

Подобные формулы применяют к каждому нутриенту:

$$\text{Нутриент на массу} = \text{Нутриент на 100 г} \times \text{Масса в граммах} / 100 \text{ (с умножением на К)}.$$

Разработанный модуль представляет собой инструмент для стандартизированной оценки пищевой ценности кулинарной продукции, обеспечивающий воспроизводимость результатов и сопоставимость данных в рамках проводимых исследований фактического питания.

Модуль 4. Базы данных

В состав программного комплекса входят 3 базы данных, включающие:

- базу данных химического состава продовольственного сырья и пищевой продукции промышленного производства;

- базу данных химического состава блюд и кулинарных изделий;
- базу данных потерь массы и пищевых веществ при механической или термической обработке.

Для формирования репрезентативной базы данных кулинарных изделий разработан многоуровневый алгоритм приоритизации, основанный на комплексном анализе данных эпидемиологических исследований и информации, полученной через специализированный онлайн-инструмент. Методология включала следующие критерии оценки:

- количественный анализ распространенности – вычисление интегрального показателя значимости рецепта на основе частоты упоминания в опросах и регулярности приготовления;
- региональная репрезентативность – определение географической и этнокультурной специфики рецептов с расчетом относительных рейтингов внутри каждой кулинарной традиции;
- нутриентная значимость – оценка вклада блюда в общую калорийность рациона целевых групп населения;
- кластеризация рецептов – идентификация уникальных рецептов методами машинного обучения с группировкой по ключевым параметрам: составу ингредиентов и способам кулинарной обработки.

Процедура интеграции в базу данных реализует автоматизированную категоризацию с проверкой на дубликаты, обновлением статистических показателей для существующих записей и пополнением базы новыми рецептурами с сохранением полной атрибутивной информации.

Разработанный алгоритм обеспечивает научно обоснованный отбор наиболее репрезентативных образцов кулинарных изделий для последующего анализа их химического состава.

Для точного расчета химического состава готовых кулинарных изделий и прогнозирования изменений пищевой ценности в процессе технологической обработки была разработана специализированная база данных «Потери пищевых веществ при механической или термической обработке пищевой продукции» [27]. БДХС, реализованная на платформе MySQL, представляет собой систему взаимосвязанных таблиц, содержащих детализированную информацию о величинах потерь массы и нутриентов.

Особенностью базы данных является интеграция информации из авторитетных международных и национальных источников. В структуру базы включены таблицы с данными из фундаментальных российских справочников под редакцией И.М. Скурихина, содержащих коэффициенты потерь для традиционных способов кулинарной обработки. Кроме того, система аккумулирует информацию из источников Министерства сельского хозяйства США (USDA), включая таблицы выхода продуктов и коэффициентов сохранности пищевых веществ.

База данных также содержит сведения из реестра организации Стандартов пищевых продуктов Австралии и Новой Зеландии (FSANZ) и материалы Европейской

сети информационных ресурсов о пищевых продуктах (EuroFIR). Подобная многокомпонентная структура обеспечивает репрезентативность и достоверность информации, позволяя учитывать региональные особенности технологической обработки пищевой продукции.

Ключевым элементом базы является система кодификации видов кулинарной обработки, обеспечивающая унификацию и стандартизацию описания технологических процессов. Связи между таблицами позволяют осуществлять выборку величин потерь как по отдельным источникам с учетом конкретного вида сырья и способа обработки, так и получать усредненные значения на основе консолидированных данных. Это обеспечивает гибкость использования базы данных при решении различных прикладных задач – от расчета пищевой ценности готовых блюд до оптимизации технологических процессов с целью минимизации потерь нутриентов.

Методология интеграции верифицированных данных в базу химического состава пищевых продуктов

С целью объединения модулей в единый программный комплекс была разработана комплексная процедура интеграции новых верифицированных данных в существующую базу химического состава, обеспечивающая сохранение целостности и актуальности информации. Методология включала 4 последовательных этапа:

1. Аудит существующей базы данных с комплексным анализом структурной организации данных с оценкой форматов хранения, типов данных и системы идентификаторов, а также верификацией целостности существующих записей и их соответствия установленным стандартам.
2. Идентификация и удаление дублирующихся записей реализованы через алгоритмы детекции дубликатов на основе комбинации методов точного сопоставления (по уникальным идентификаторам) и анализа текстовой схожести с применением специализированных метрик. Разработаны критерии приоритизации записей при обнаружении противоречий.
3. Процедура интеграции новых данных и актуализация существующих включает многоуровневую систему верификации и сопоставления:
 - структурный анализ поступающих данных и их источников;
 - применение комбинированных алгоритмов сопоставления записей;
 - протоколы разрешения конфликтующих значений;
 - транзакционные механизмы обеспечения целостности данных;
 - систему автоматизированного резервного копирования.
4. Для расширения перечня нутриентов реализованы процедуры пополнения базы данных новыми показателями химического состава с обеспечением совместимости с существующей структурой и методологией расчетов.

Предложенная методология обеспечивает систематическое обновление базы данных с минимальным риском потери информации и сохранением методологической согласованности, что соответствует требованиям современных исследований в области нутрициологии и пищевой безопасности.

Заключение

В настоящем исследовании реализована комплексная система управления данными о химическом составе пищевых продуктов, что обеспечивает прогресс в развитии цифровой нутрициологии в Российской Федерации. Разработанный программно-аналитический комплекс эффективно устраняет пробел в исследовательской инфраструктуре за счет создания единой верифицированной базы данных, репрезентативно отражающей современную структуру питания населения. Комплекс размещен на сайте ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» и доступен по ссылке: <https://ion.ru/nauka/baza-dannykh-khimicheskogo-sostava/>

Ключевым достижением работы стало создание интегрированной модульной архитектуры, объединяющей 3 специализированные базы данных. Научную и практическую ценность представляют разработанные алгоритмы многоуровневой верификации и нормализации данных, которые обеспечивают сопоставимость результатов из разнородных источников и минимизируют систематические погрешности, что в итоге позволяет применять разработанные алгоритмы для анализа результатов крупномасштабных мониторинговых исследований качества и химического состава пищевой продукции. Важным практическим достижением стало создание инструментов для расчета пищевой ценности готовых блюд с учетом технологических потерь, что особенно актуально для точной оценки домашнего питания.

Предложенная система обеспечивает полный жизненный цикл управления данными – от первичного сбора и верификации до комплексного анализа и долгосрочного хранения.

Реализация данного проекта создает прочную инфраструктурную основу для разработки научно обоснованных рекомендаций по питанию и мер профилактики алиментарно-зависимых заболеваний. Перспективы дальнейшего развития комплекса связаны с расширением перечня анализируемых нутриентов и интеграцией с программным обеспечением различного назначения, в том числе для врачей-диетологов и специалистов в области общественного питания, для расчетов рационов для организованных коллективов, а также приложений для индивидуальной оценки питания и информирования населения об энергетической и пищевой ценности рационов. Реализация проекта обеспечит доказательную основу для эпидемиологических исследований, разработки мер профилактики алиментарно-зависимых заболеваний и формирования научно обоснованной государственной политики в области здорового питания.

Сведения об авторах

ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (Москва, Российская Федерация):

Смирнова Елена Александровна (Elena A. Smirnova) – кандидат технических наук, заведующий лабораторией демографии и эпидемиологии питания

E-mail: smirnova@ion.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2045-5729>

Бессонов Владимир Владимирович (Vladimir V. Bessonov) – доктор биологических наук, заведующий лабораторией химии пищевых продуктов

E-mail: bessonov@ion.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3587-5347>

Шахвалиева Элина Саид-Аминовна (Elina S.-A. Shakhvalieva) – лаборант-исследователь лаборатории демографии и эпидемиологии питания

E-mail: shelina9558@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0000-7535-8523>

Щербakov Григорий Дмитриевич (Grigory D. Shcherbakov) – ведущий инженер лаборатории демографии и эпидемиологии питания

E-mail: sherbakovgrigory@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9046-6837>

Кешабянц Эвелина Эдуардовна (Evelina E. Keshabyants) – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник лаборатории демографии и эпидемиологии питания

E-mail: evk1410@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9762-2647>

Андропова Мария Сергеевна (Maria S. Andronova) – лаборант-исследователь лаборатории демографии и эпидемиологии питания

E-mail: ndmasen@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1214-7344>

Тутельян Виктор Александрович (Viktor A. Tutelyan) – академик РАН, доктор медицинских наук, профессор, научный руководитель

E-mail: tutelyan@ion.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4164-8992>

Литература

1. Тутельян В.А., Тармаева И.Ю., Каде М.А., Никитюк Д.Б. Медицина будущего: роль искусственного интеллекта в оптимизации питания для здоровьесбережения населения России // Вопросы питания. 2024. Т. 93, № 4. С. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-4-6-13>
2. Бессонов В.В., Богачук М.Н., Боков Д.О., Макаренко М.А., Малинкин А.Д., Сокуренок М.С. и др. Базы данных химического состава пищевых продуктов в эпоху цифровой нутрициологии // Вопросы питания. 2020. Т. 89, № 4. С. 211–219. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10058>
3. Moshfegh A.J., Rhodes D.G., Martin C.L. National food intake assessment: technologies to advance traditional methods // Annu. Rev. Nutr. 2022. Vol. 42. P. 401–422. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-062320-110636>
4. Kapsokafalou M., Roe M., Turrini A., Costa H.S., Martinez-Victoria E., Marletta L. et al. Food composition at present: new challenges // Nutrients. 2019. Vol. 11, N 8. P. 1714. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu11081714>
5. Li Z., Forester S., Jennings-Dobbs E., Heber D. Perspective: a comprehensive evaluation of data quality in nutrient databases // Adv. Nutr. 2023. Vol. 14, N 3. P. 379–391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adv-nut.2023.02.005>
6. Durazzo A., Astley S., Kapsokafalou M., Costa H.S., Mantur-Vierendael A., Pijls L. et al. Food composition data and tools online and their use in research and policy: EuroFIR AISBL contribution in 2022 // Nutrients. 2022. Vol. 14, N 22. P. 4788. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu14224788>
7. Fujiwara A., Omura Y., Oono F., Sugimoto M., Sasaki S., Takimoto H. A Scoping review of epidemiological studies on intake of sugars in geographically dispersed Asian countries: comparison of dietary assessment methodology // Adv. Nutr. 2022. Vol. 13, N 5. P. 1947–1973. DOI: <https://doi.org/10.1093/advances/nmac061>
8. Liu Y., Cheng J., Wan L., Chen W. Total and added sugar intakes are increasing among children and adolescents in China: findings from CHNS 1997–2011 // Nutrients. 2022. Vol. 14, N 16. P. 3340. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu14163340>
9. Zhong L., Blekkenhorst L.C., Bondonno N.P., Sim M., Woodman R.J., Croft K.D. et al. A food composition database for assessing nitrate intake from plant-based foods // Food Chem. 2022. Vol. 394. Article ID 133411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133411>
10. Shaheen N., Basak Tukun A., Torab Ma Rahim A., Mohiduzzaman M., Islam S., Stadlmayr B. et al. Development of a new food composition table: an updated tool for estimating nutrient intake in Bangladeshi population // Food Chem. 2022. Vol. 395. Article ID 133544. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133544>
11. Carter M.C., Hancock N., Albar S.A., Brown H., Greenwood D.C., Hardie L.J. et al. Development of a new branded UK food composition database for an online dietary assessment tool // Nutrients. 2016. Vol. 8, N 8. P. 480. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu8080480>
12. Andrés-Hernández L., Blumberg K., Walls R.L., Dooley D., Mauleon R., Lange M. et al. Establishing a common nutritional vocabulary – from food production to diet // Front. Nutr. 2022. Vol. 9. Article ID 928837. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.928837>
13. Jamieson J.A., Gill K., Fisher S., English M. Development of a Canadian food composition database of gluten-free products // Foods. 2022. Vol. 11, N 15. P. 2215. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11152215>
14. Vijayakumar A., Dubasi H.B., Awasthi A., Jaacks L.M. Development of an Indian food composition database // Curr. Dev. Nutr. 2024. Vol. 8, N 7. Article ID 103790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cdnut.2024.103790>
15. Шахвалиева Э.С.-А., Андропова М.С., Смирнова Е.А., Кешабянц Э.Э., Кудрявцева К.В., Щербakov Г.Д. и др. Программный комплекс для сбора данных химического состава пищевых продуктов [Электронный ресурс] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025610194. Зарегистрировано 09.01.2025.
16. Щербakov Г.Д., Бессонов В.В., Смирнова Е.А., Кешабянц Э.Э., Тутельян В.А. Программный комплекс для анализа результатов исследований химического состава пищевых продуктов [Электронный ресурс] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023687055. Зарегистрировано 11.12.2023.

17. Kigo S.N., Omondi E.O., Omolo B.O. Assessing predictive performance of supervised machine learning algorithms for a diamond pricing model // *Sci. Rep.* 2023. Vol. 13, N 1. Article ID 17315. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44326-w>
18. Casella M., Milano N., Dolce P., Marocco D. Transformers deep learning models for missing data imputation: an application of the ReMasker model on a psychometric scale // *Front. Psychol.* 2024. Vol. 17, N 15. Article ID 1449272. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1449272>
19. Li J., Guo S., Ma R., He J., Zhang X., Rui D. et al. Comparison of the effects of imputation methods for missing data in predictive modelling of cohort study datasets // *BMC Med. Res. Methodol.* 2024. Vol. 24, N 1. P. 41. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12874-024-02173-x>
20. Baumgartner M., Kuhn C., Nakas C.T., Herzig D., Bally L. Carbohydrate estimation accuracy of two commercially available smartphone applications vs estimation by individuals with type 1 diabetes: a comparative study // *J. Diabetes Sci. Technol.* 2025. Vol. 19, N 6. P. 1570–1577. DOI: <https://doi.org/10.1177/19322968241264744>
21. Coucke W., China B., Delattre I., Lenga Y., Van Blerk M., Van Campenhout C. et al. Comparison of different approaches to evaluate External Quality Assessment Data // *Clin. Chim. Acta.* 2012. Vol. 413, N 5–6. P. 582–586. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cca.2011.11.030>
22. Starczewski A., Cader A. Determining the eps parameter of the DBSCAN algorithm // *Artificial Intelligence and Soft Computing. ICAISC 2019* (Book series: Lecture Notes in Computer Science. Vol. 11509) / Eds L. Rutkowski, R. Scherer, M. Korytkowski, W. Pedrycz, R. Tadeusiewicz, J. Zurada. Cham : Springer, 2019. P. 420–430. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20915-5_38 Print ISBN: 978-3-030-20914-8; Online ISBN: 978-3-030-20915-5.
23. Latifi-Pakdehi A., Daneshpour N. DBHC: A DBSCAN-based hierarchical clustering algorithm // *Data Knowledge Eng.* 2021. Vol. 135, N 1. Article ID 101922. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.datak.2021.101922>
24. Ng H.T., Ibrahim H., Rajendran P. Statistical-based methods to improve precision of DBSCAN clustering algorithm for obstacle detection application in autonomous vehicles // *Multimed. Tools Appl.* 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-025-20986-w>
25. Rahnenführer J., De Bin R., Benner A., Ambrogio F., Lusa L., Boulesteix A.L. et al. Statistical analysis of high-dimensional biomedical data: a gentle introduction to analytical goals, common approaches and challenges // *BMC Med.* 2023. Vol. 21, N 1. P. 182. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12916-023-02858-y>
26. Zhang X., Lee J., Wen Bin Goh W. An investigation of how normalisation and local modelling techniques confound machine learning performance in a mental health study // *Heliyon.* 2022. Vol. 8, N 5. Article ID e09502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09502>
27. Андропова М.С., Шахвалиева Э.С.-А., Кешабянц Э.Э., Кудрявцева К.В., Щербаков Г.Д., Смирнова Е.А., Тутельян В.А. Потери пищевых веществ при механической и термической обработке пищевой продукции [Электронный ресурс] // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025620084. Зарегистрировано 09.01.2025.

References

1. Tutel'yan V.A., Tarmaeva I.Yu., Kade M.A., Nikityuk D.B. Medicine of the future: the role of artificial intelligence in optimizing nutrition for the health of the Russian population. *Voprosy pitaniia* [Problems of Nutrition]. 2024; 93 (4): 6–13. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-4-6-13> (in Russian)
2. Bessonov V.V., Bogachuk M.N., Bokov D.O., Makarenko M.A., Malinkin A.D., Sokurenko M.S., et al. Databases of the chemical composition of foods in the era of digital nutrition science. *Voprosy pitaniia* [Problems of Nutrition]. 2020; 89 (4): 211–9. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10058> (in Russian)
3. Moshfegh A.J., Rhodes D.G., Martin C.L. National food intake assessment: technologies to advance traditional methods. *Annu Rev Nutr.* 2022; 42: 401–422. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-062320-110636>
4. Kapsokefalou M., Roe M., Turrini A., Costa H.S., Martinez-Victoria E., Marletta L., et al. Food composition at present: new challenges. *Nutrients.* 2019; 11 (8): 1714. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu11081714>
5. Li Z., Forester S., Jennings-Dobbs E., Heber D. Perspective: a comprehensive evaluation of data quality in nutrient databases. *Adv Nutr.* 2023; 14 (3): 379–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advnut.2023.02.005>
6. Durazzo A., Astley S., Kapsokefalou M., Costa H.S., Mantur-Vierendeel A., Pijls L., et al. Food composition data and tools online and their use in research and policy: EuroFIR AISBL contribution in 2022. *Nutrients.* 2022; 14 (22): 4788. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu14224788>
7. Fujiwara A., Omura Y., Oono F., Sugimoto M., Sasaki S., Takimoto H. A Scoping review of epidemiological studies on intake of sugars in geographically dispersed Asian countries: comparison of dietary assessment methodology. *Adv Nutr.* 2022; 13 (5): 1947–73. DOI: <https://doi.org/10.1093/advances/nmac061>
8. Liu Y., Cheng J., Wan L., Chen W. Total and added sugar intakes are increasing among children and adolescents in China: findings from CHNS 1997–2011. *Nutrients.* 2022; 14 (16): 3340. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu14163340>
9. Zhong L., Blekkenhorst L.C., Bondonno N.P., Sim M., Woodman R.J., Croft K.D., et al. A food composition database for assessing nitrate intake from plant-based foods. *Food Chem.* 2022; 394: 133411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133411>
10. Shaheen N., Basak Tukun A., Torab Ma Rahim A., Mohiduzzaman M., Islam S., Stadlmayr B., et al. Development of a new food composition table: an updated tool for estimating nutrient intake in Bangladeshi population. *Food Chem.* 2022; 395: 133544. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133544>
11. Carter M.C., Hancock N., Albar S.A., Brown H., Greenwood D.C., Hardie L.J., et al. Development of a new branded UK food composition database for an online dietary assessment tool. *Nutrients.* 2016; 8 (8): 480. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu8080480>
12. Andrés-Hernández L., Blumberg K., Walls R.L., Dooley D., Mauleon R., Lange M., et al. Establishing a common nutritional vocabulary – from food production to diet. *Front Nutr.* 2022; 9: 928837. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.928837>
13. Jamieson J.A., Gill K., Fisher S., English M. Development of a Canadian food composition database of gluten-free products. *Foods.* 2022; 11 (15): 2215. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11152215>
14. Vijayakumar A., Dubasi H.B., Awasthi A., Jaacks L.M. Development of an Indian food composition database. *Curr Dev Nutr.* 2024; 8 (7): 103790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cdnut.2024.103790>
15. Shakhvalieva E.S.-A., Andronova M.S., Smirnova E.A., Keshabyants E.E., Kudryavtseva K.V., Shcherbakov G.D., et al. Software complex for collecting food chemical composition data [Electronic resource]. Certificate of state registration of computer program No. 2025610194. Registered 09.01.2025. (in Russian)
16. Shcherbakov G.D., Bessonov V.V., Smirnova E.A., Keshabyants E.E., Tutel'yan V.A. Software complex for analyzing food chemical composition research results [Electronic resource]. Certificate of state registration of computer program No. 2023687055. Registered 11.12.2023. (in Russian)
17. Kigo S.N., Omondi E.O., Omolo B.O. Assessing predictive performance of supervised machine learning algorithms for a diamond pricing model. *Sci Rep.* 2023; 13 (1): 17315. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44326-w>
18. Casella M., Milano N., Dolce P., Marocco D. Transformers deep learning models for missing data imputation: an application of the ReMasker model on a psychometric scale. *Front Psychol.* 2024; 17 (15): 1449272. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1449272>
19. Li J., Guo S., Ma R., He J., Zhang X., Rui D., et al. Comparison of the effects of imputation methods for missing data in predictive modelling of cohort study datasets. *BMC Med Res Methodol.* 2024; 24 (1): 41. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12874-024-02173-x>
20. Baumgartner M., Kuhn C., Nakas C.T., Herzig D., Bally L. Carbohydrate estimation accuracy of two commercially available smartphone applications vs estimation by individuals with type 1 diabetes: a comparative study. *J Diabetes Sci Technol.* 2025; 19 (6): 1570–7. DOI: <https://doi.org/10.1177/19322968241264744>
21. Coucke W., China B., Delattre I., Lenga Y., Van Blerk M., Van Campenhout C., et al. Comparison of different approaches to evaluate External Quality Assessment Data. *Clin Chim Acta.* 2012; 413 (5–6): 582–6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cca.2011.11.030>
22. Starczewski A., Cader A. Determining the eps parameter of the DBSCAN algorithm. In: L. Rutkowski, R. Scherer, M. Korytkowski, W. Pedrycz, R. Tadeusiewicz, J. Zurada (eds). *Artificial Intelligence and Soft Computing. ICAISC 2019* (Book series: Lecture Notes in Computer Science. Vol. 11509). Cham : Springer, 2019. P. 420–30. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20915-5_38 Print ISBN: 978-3-030-20914-8; Online ISBN: 978-3-030-20915-5.
23. Latifi-Pakdehi A., Daneshpour N. DBHC: A DBSCAN-based hierarchical clustering algorithm. *Data Knowledge Eng.* 2021; 135 (1): 101922. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.datak.2021.101922>
24. Ng H.T., Ibrahim H., Rajendran P. Statistical-based methods to improve precision of DBSCAN clustering algorithm for obstacle detection

- tion application in autonomous vehicles. *Multimed. Tools Appl.* 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-025-20986-w>
25. Rahnenführer J., De Bin R., Benner A., Ambroggi F., Lusa L., Boul-esteix A.L., et al. Statistical analysis of high-dimensional biomedical data: a gentle introduction to analytical goals, common approaches and challenges. *BMC Med.* 2023; 21 (1): 182. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12916-023-02858-y>
26. Zhang X., Lee J., Wen Bin Goh W. An investigation of how normalisation and local modelling techniques confound machine learning performance in a mental health study. *Heliyon.* 2022; 8 (5): e09502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09502>
27. Andronova M.S., Shakhvalieva E.S.-A., Keshabyants E.E., Kudryavtseva K.V., Shcherbakov G.D., Smirnova E.A., Tutel'yan V.A. Losses of nutrients during mechanical and thermal processing of foods [Electronic resource]. Certificate of state registration of computer program No. 2025620084. Registered 09.01.2025. (in Russian)

Для корреспонденции

Трушина Элеонора Николаевна – кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией иммунологии
ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»

Адрес: 109240, Российская Федерация, г. Москва,

Устьинский проезд, д. 2/14

Телефон: (495) 698-53-45

E-mail: trushina@ion.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0035-3629>

Трушина Э.Н.¹, Ригер Н.А.¹, Никитюк Д.Б.^{1–3}

Эффективность применения спирулины (*Arthrospira platensis*) в клинике и эксперименте: механизмы действия и перспективы использования в качестве функционального пищевого ингредиента

Clinical and experimental efficacy of spirulina (*Arthrospira platensis*): mechanisms of action and prospects for use as a functional food ingredient

Trushina E.N.¹, Rieger N.A.¹, Nikityuk D.B.^{1–3}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, 109240, г. Москва, Российская Федерация

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), 119991, г. Москва, Российская Федерация

³ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», 117198, г. Москва, Российская Федерация

¹ Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, 109240, Moscow, Russian Federation

² I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), 119991, Moscow, Russian Federation

³ Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, 117198, Moscow, Russian Federation

Распространенность хронических заболеваний, в том числе алиментарно-зависимых, отличительной особенностью которых является наличие хронического неспецифического воспаления и окислительного стресса, диктует

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-16-00006-П, <https://rscf.ru/project/22-16-00006>.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Вклад авторов. Дизайн исследования, сбор, анализ и обобщение данных, написание текста – Трушина Э.Н., Ригер Н.А.; редактирование – Никитюк Д.Б.; утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи – все авторы.

Для цитирования: Трушина Э.Н., Ригер Н.А., Никитюк Д.Б. Эффективность применения спирулины (*Arthrospira platensis*) в клинике и эксперименте: механизмы действия и перспективы использования в качестве функционального пищевого ингредиента // Вопросы питания. 2025. Т. 94, № 6. С. 80–89. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-80-89>

Статья поступила в редакцию 08.08.2025. Принята в печать 20.10.2025.

Funding. The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 22-16-00006-P (<https://rscf.ru/project/22-16-00006>).

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

Contribution. Research design, data collection, analysis and synthesis, writing of the text – Trushina E.N., Rieger N.A.; editing – Nikityuk D.B.; approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article – all authors.

For citation: Trushina E.N., Rieger N.A., Nikityuk D.B. Clinical and experimental efficacy of spirulina (*Arthrospira platensis*): mechanisms of action and prospects for use as a functional food ingredient. Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]. 2025; 94 (6): 80–9. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-80-89> (in Russian)

Received 08.08.2025. Accepted 20.10.2025

необходимость разработки и внедрения новых отечественных специализированных пищевых продуктов, обладающих иммуномодулирующими и антиоксидантными свойствами. Доказанный терапевтический потенциал спирулины является основой для ее включения в специализированную пищевую продукцию диетического (лечебного и профилактического) питания.

Цель исследования – анализ и обобщение данных, характеризующих механизмы иммунной и антиоксидантной защиты, вовлеченные в реализацию клинических эффектов спирулины.

Материал и методы. Для поиска источников за последние 7 лет использовали библиографические базы РИНЦ, PubMed, Scopus и некоммерческую поисковую систему Google Scholar.

Результаты. В обзоре представлены материалы исследований, посвященных изучению терапевтического потенциала спирулины (*Arthrospira platensis*) и биологически активных веществ, входящих в ее состав. Одним из наиболее значимых эффектов применения спирулины является ее иммуномодулирующая активность. Исследования показали, что регулярное употребление спирулины может повысить как врожденный, так и адаптивный иммунитет за счет повышения активности НК-клеток, макрофагов и Т-лимфоцитов. Иммуностимулирующий эффект проявляется в активации выработки иммуноглобулинов и подавлении генов, участвующих в экспрессии провоспалительных цитокинов. Установлено, что полисахариды спирулины стимулируют выработку цитокинов, таких как интерферон γ и интерлейкин 2, которые имеют решающее значение для активации иммунных клеток и координации иммунного ответа. Антиоксидантная и противовоспалительная активность спирулины во многом определяется высоким содержанием в ней фикоцианинов и каротиноидов. Фикоцианины эффективно нейтрализуют активные формы кислорода, подавляют экспрессию генов, связанных с воспалением, таких как iNOS, COX-2, TNFA и IL1B, а также ингибируют промоторную активность индуцибельной синтазы оксида азота (iNOS) и ядерного транскрипционного фактора NF- κ B.

Заключение. Таким образом, имеются доказательства прямого влияния биологически активных веществ спирулины на механизмы иммунорегуляции. Накопленный помимо этого фактический материал, свидетельствующий о наличии у спирулины антиканцерогенных, гипогликемических и гиполипидемических свойств, подтверждает возможность ее применения для профилактики и лечения ряда хронических заболеваний.

Ключевые слова: спирулина (*Arthrospira platensis*); фикоцианины; биологически активные вещества; иммунитет; цитокины; лечебное и профилактическое питание

The prevalence of chronic diseases, including alimentary ones, characterized by chronic nonspecific inflammation and oxidative stress, dictates the need to develop and implement new domestic specialized food with immunomodulatory and antioxidant properties. The proven therapeutic potential of spirulina is the basis for its inclusion in food for special dietary uses.

The purpose of the study was to analyze and summarize the data characterizing the mechanisms of immune and antioxidant protection involved in the implementation of the clinical effects of spirulina.

Material and methods. For the search of sources over the past 7 years, the bibliographic databases RISC, PubMed, Scopus and the non-commercial search engine Google Scholar were used.

Results. The review presents research materials devoted to the study of the therapeutic potential of spirulina (*Arthrospira platensis*) and its bioactive compounds. One of the most significant effects of Spirulina is its immunomodulatory activity. Studies have shown that regular consumption of Spirulina can enhance both innate and adaptive immunity by increasing the activity of NK cells, macrophages and T lymphocytes. The immunostimulatory effect is manifested in the activation of immunoglobulin production and suppression of genes involved in the expression of proinflammatory cytokines. It has been established that Spirulina polysaccharides stimulate the production of cytokines such as interferon-gamma and interleukin-2, which are crucial for the activation of immune cells and coordination of the immune response. The antioxidant and anti-inflammatory activity of Spirulina is largely determined by its high content of phycocyanins and carotenoids. Phycocyanins effectively neutralize reactive oxygen species (ROS), suppress the expression of inflammation-related genes, such as iNOS, COX-2, TNFA and IL1B, and inhibit the promoter activity of inducible nitric oxide synthase iNOS and the nuclear transcription factor NF- κ B.

Conclusion. Thus, there is evidence of the direct influence of Spirulina bioactive compounds on the mechanisms of immunoregulation. In addition, sufficient data has been accumulated indicating that Spirulina possesses anticarcinogenic, hypoglycemic and hypolipidemic properties, which confirms the possibility of its use for the prevention and dietary treatment of a number of chronic diseases.

Keywords: Spirulina (*Arthrospira platensis*); phycocyanins; bioactive compounds; immunity; cytokines; therapeutic food, preventive nutrition

Спирулина относится к цианобактериям, принадлежащим к семейству *Microcoleaceae*, из которых *Arthrospira platensis* (A. *platensis*) наиболее изучена и активно применяется в пищевой промышленности и медицине. Спирулину относят к пищевым ингредиентам вследствие высокой пищевой ценности [1–3]. Она используется как функциональный ингредиент для профилактики и лечения различных заболеваний благодаря наличию в ее составе белков, полисахаридов, жирных кислот, витаминов, минеральных и биологически активных веществ, включающих пигменты и различные вторичные метаболиты. Терапевтический потенциал цианобактерии представлен иммуномодулирующим, антиоксидантным, противовоспалительным, противовирусным действием, выявлены также антиканцерогенный, гипогликемический и гиполипидемический эффекты [4–6]. В экспериментальном исследовании на разработанной модели вакцинации мышей линии BALB/c препаратом «Спутник V» продемонстрировано наличие иммуноадаптивных свойств фикоцианинов, проявляющихся стимулированием клеточного звена иммунитета [7].

Цель исследования – анализ и обобщение данных, характеризующих механизмы иммунной и антиоксидантной защиты, вовлеченные в реализацию клинических эффектов спирулины.

Материал и методы

Для поиска источников за последние 7 лет использовали библиографические базы РИНЦ, PubMed, данных Scopus и некоммерческую поисковую систему Google Scholar.

Макро- и микронутриенты, биологически активные вещества спирулины, обеспечивающие эффективность ее применения в пищевой промышленности и медицине

Спирулина является источником полноценного белка, содержание которого составляет 50–70% от сухой массы [8, 9]. Белок содержит все незаменимые аминокислоты и аналогичен белку животного происхождения.

Липидная фракция спирулины составляет около 5–10% от сухой массы и представлена в основном полиненасыщенными жирными кислотами (ПНЖК). Преобладающей по содержанию в спирулине является γ -линоленовая кислота (18:3n-6) – ПНЖК семейства ω -6, которая обладает доказанными противовоспалительными свойствами. Кроме того, в состав жирных кислот спирулины входят линолевая (18:2n-6), олеиновая (18:1n-9) и пальмитиновая (16:0) кислоты [10].

Углеводы составляют приблизительно 15–20% от сухой массы спирулины и находятся в основном в форме полисахаридов [6]. Важно отметить, что спирулина содержит сульфатированные полисахариды, которые известны своими иммуномодулирующими свойствами, определяющими активность врожденных и адаптивных механизмов иммунного ответа. Моносахариды, обнаружен-

ные в спирулине, включают глюкозу, рамнозу, ксилозу, маннозу, галактозу, арабинозу и фукозу в различных молярных соотношениях. Многослойные полимеры глюкозы и пептидогликана, покрытые снаружи оболочкой из кислых полисахаридов, обеспечивают целостность клеточной стенки цианобактерий [11].

Фотосинтетические пигменты спирулины представлены источниками фикоцианинов – фикобилипротеинами, содержание которых может составлять до 47% ее сухой массы [10]. Фикоцианины и хлорофилл участвуют в фотосинтезе, а также обладают антиоксидантными свойствами [12].

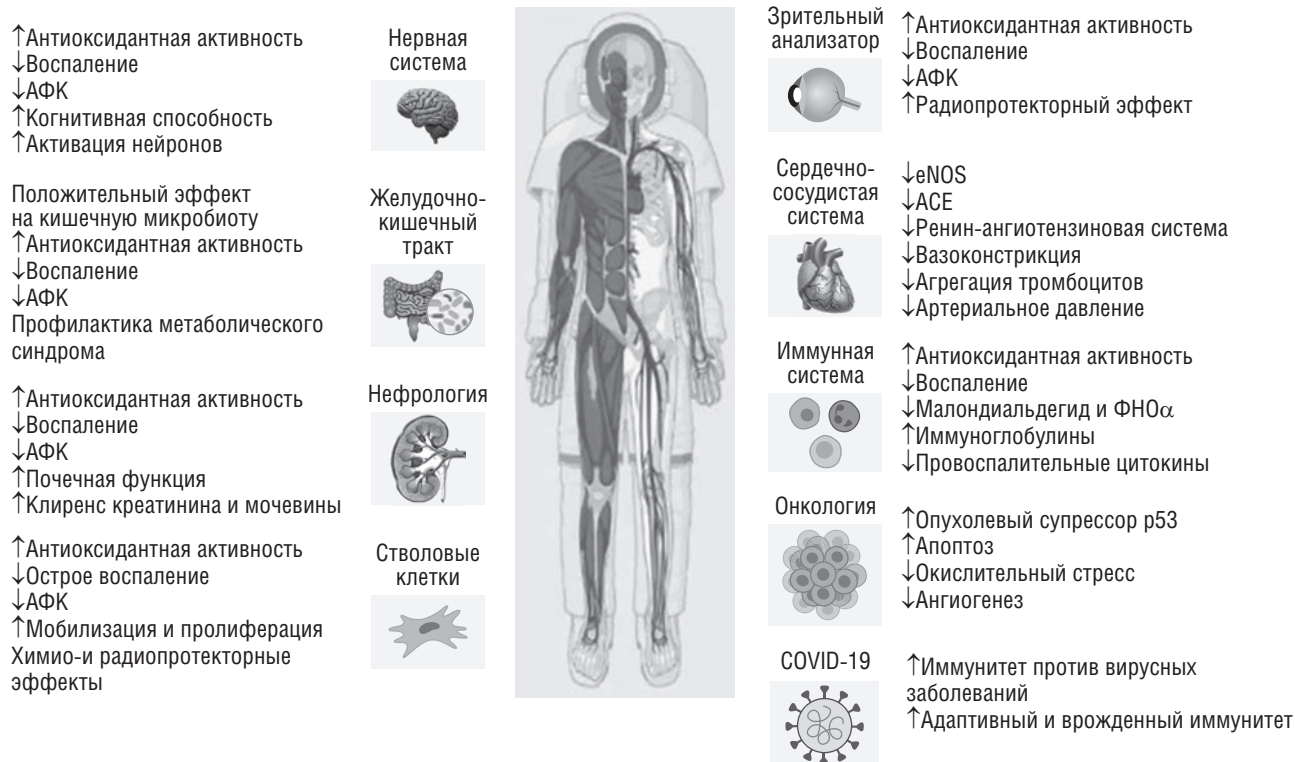
Спирулина является дополнительным источником витаминов группы В: тиамина (В₁), рибофлавина (В₂), ниацина (В₃) и фолиевой кислоты (В₉), которые имеют важное значение для энергетического обмена и клеточного метаболизма [12–14]. Кроме того, спирулина содержит жирорастворимые витамины, в частности витамин Е (α -токоферол) и витамин А в форме β -каротина [10]. Макро- и микроэлементы спирулины (калий, фосфор, железо, цинк, марганец, хром и др.) участвуют в поддержании клеточного гомеостаза и метаболических процессов [15]. Содержание железа может варьировать от 28 до 50 мг на 100 г сухой массы цианобактерии, что свидетельствует о перспективе ее использования в диетотерапии пациентов с железодефицитной анемией [16].

В дополнение к основным компонентам спирулина содержит ряд вторичных метаболитов, которые обеспечивают ее биологическую активность. К ним относятся полифенолы, стерины и фенольные кислоты. Минорные биологически активные вещества спирулины включают галловую, хлорогеновую, коричную, п-гидроксibenзойную, неохлорогеновую кислоты, а также флавоноиды: рутин, кверцетин, нарингенин, кемпферол и другие [17]. Минорные биологически активные вещества участвуют в реализации иммуномодулирующих, антиоксидантных и ряда других эффектов применения спирулины [18–20].

Механизмы, лежащие в основе клинической эффективности применения спирулины

Спирулина благодаря широкому спектру биологически активных веществ, входящих в ее состав, оказывает протективное влияние на организм человека при различных патологических состояниях (см. рисунок).

Одним из наиболее значимых терапевтических эффектов спирулины является ее иммуномодулирующая активность [22, 23]. Исследования показали, что регулярное употребление спирулины может повысить как врожденный, так и адаптивный иммунитет за счет повышения активности NK-клеток, макрофагов и Т-лимфоцитов. Иммуностимулирующий эффект проявляется в активации выработки иммуноглобулинов и подавлении генов, участвующих в экспрессии провоспалительных цитокинов [24]. Нутрицевтики на основе спирулины повышают адаптивный и врожденный иммунитет, а биоактивные соединения, такие как ингибиторы ангиотензин-превращающего фермента, фикобилипротеины, сульфатированные полисахариды и спирулан кальция,



Механизмы влияния спирулины на организм человека (адаптировано по: G. Fais и соавт., 2022 г. [21])

АФК – активные формы кислорода; eNOS – синтаза оксида азота; ACE – ангиотензин-превращающий фермент; ФНОα – фактор некроза опухоли α.

Mechanisms of influence of spirulina on the human body (Adapted from: Fais G. et al, 2022 [21])

могут служить противовирусными средствами [25]. Спирулина продемонстрировала противовирусные свойства преимущественно против оболочечных вирусов, таких как вирус простого герпеса, гриппа А, иммунодефицита человека, гепатита С, COVID-19, цитомегаловируса человека [26]. Фермент L-аспарагиназа, присутствующий в спирулине, проявил высокую противовирусную активность *in vitro* против вируса Коксаки В3 [27].

Спирулина также обладает антимикробной активностью против патогенных бактерий и грибов [28]. Установлено, что ее биоактивные соединения, включая фенольные кислоты и пептиды, подавляют рост патогенных микроорганизмов, что свидетельствует в пользу применения спирулины в составе антимикробной терапии и в качестве натурального консерванта в пищевых продуктах [29].

К настоящему времени имеется достаточный фактический материал о механизмах иммуотропного действия спирулины. Так, установлено, что полисахариды спирулины стимулируют выработку цитокинов, таких как интерферон γ (ИФН-γ) и интерлейкин 2 (ИЛ-2), которые имеют решающее значение для активации иммунных клеток и координации иммунного ответа [30]. В исследованиях *in vitro* на макрофагальной клеточной культуре RAW246.7 показана иммуностимулирующая активность гетерополисахарида спирулины, заключающаяся в уси-

лении фагоцитарной способности, активации секреции оксида азота (NO), ИЛ-1β, ИЛ-6 и фактора некроза опухоли α (ФНОα). Активация иммунного ответа является результатом воздействия сульфатных групп, сульфатных эфиров и аминокислот, присутствующих в полисахаридах спирулины.

Исследования *in vivo* на мышах линии Kunming показали, что полисахаридные фракции *Spirulina platensis* могут дозозависимо (500, 1000 и 1500 мг на 1 кг массы тела в сутки) ослаблять вызванную циклофосфамидом иммуносупрессию у мышей с повышением уровня цитокинов ФНОα, ИЛ-10 и ИФН-γ в сыворотке крови [31]. В опытах с клеточными культурами *in vitro* фракции полисахаридов стимулировали пролиферацию спленоцитов и клеток макрофагальной линии RAW 264.7 с повышением синтеза ФНОα и ИЛ-6. Результаты исследования сигнальных путей показали, что полисахариды активируют на мембране клеток RAW246.7 толл-подобный рецептор 4 (TLR4), что вызывает запуск каскадов митоген-активируемых протеинкиназ (MAPKs) и транскрипционного фактора NF-κB [31]. Кроме того, было отмечено, что введение полисахаридов дозозависимо восстанавливает количество лейкоцитов и лимфоцитов; это позволяет предположить, что полисахариды могут обеспечить защиту от миелосупрессии, индуцированной цитостатиком циклофосфамидом. Костный

мозг – важный центральный иммунный орган организма. В костном мозге происходит образование многих предшественников иммунокомпетентных клеток, а также дифференцировка и созревание В-лимфоцитов. Миелосупрессия является главным ограничивающим фактором, влияющим на исход и достижение ремиссии у пациентов с различными онкозаболеваниями (особенно онкогематологическими), получающих химиотерапию. Снижение количества клеток периферической крови отражает повреждение гемопоэтических стволовых предшественников, вызванное цитостатиками. Различные цитокины, секретируемые лимфоцитами Th1 (хелперы 1-го типа) и Th2 (хелперы 2-го типа), являются основными факторами, определяющими различия в клеточных функциях. Лимфоциты Th1 секретируют ИЛ-2, ИФН- γ и ФНО α , которые определяют клеточный иммунный ответ, тогда как лимфоциты Th2 секретируют ИЛ-4, -6 и -10, способствующие гуморальному иммунному ответу. Пероральное введение мышам с циклофосфамидной иммуносупрессией полисахаридных фракций спирулины с низкой молекулярной массой продемонстрировало их высокую иммуностимулирующую активность. Предполагается, что активация иммунитета *in vivo* и стимуляция пролиферации спленоцитов и клеток макрофагальной линии RAW 264.7 *in vitro* осуществляются посредством включения сигнальных путей MAPK, NF- κ B через рецептор TLR4 и повышение транскрипции mPHK в протеинкиназных каскадах p38/JNK/ERK. Следовательно, спирулина эффективно регулирует ERK1/2, JNK, p38 и I κ B-сигнальные пути [31, 32].

Имеются сообщения, свидетельствующие о том, что спирулина модулирует иммунный ответ при наличии аллергических реакций [33]. Однако применение спирулины у пациентов с нарушением иммунной регуляции, таких как аутоиммунные заболевания и аллергия, может привести к обострению патологического процесса [34].

Антиоксидантная и противовоспалительная активность спирулины во многом объясняется высоким содержанием в ней фикоцианинов, каротиноидов и хлорофилла [4, 19, 35, 36]. Фикоцианины эффективно нейтрализуют свободные радикалы, такие как супероксидные анионы, гидроксильные и пероксильные радикалы, и ингибируют перекисное окисление липидов в печени [19]. β -Каротин также действует как антиоксидант и противовоспалительный агент. Он блокирует внутриклеточное накопление активных форм кислорода (АФК), подавляет экспрессию генов, связанных с воспалением, таких как *iNOS*, *COX-2*, *TNFA* и *IL1B*, а также ингибирует промоторную активность индуцибельной синтазы оксида азота (*iNOS*) и ядерного транскрипционного фактора NF- κ B [37]. Таким образом, имеются доказательства прямого влияния биологически активных веществ спирулины на механизмы иммунорегуляции. В частности, клинические исследования показали, что прием спирулины спортсменами в дозировках от 1 до 6 г/сут в течение 3–8 нед предотвращает или снижает развитие окислительного стресса в условиях интенсивных физических нагрузок и может стимулиро-

вать выработку антител и повышать или понижать экспрессию генов большого спектра цитокинов, участвующих в иммуномодулирующих и противовоспалительных реакциях [5, 32].

Молекулярные механизмы иммуномодулирующего действия спирулины недостаточно изучены, но известно, что фикоцианин и β -каротин являются основными молекулами, обладающими способностью эффективно регулировать ERK1/2, JNK, p38 и I κ B-сигнальные пути [32]. В обзоре [38] показана возможность использования фикоцианобилина в качестве противовоспалительного средства для снижения провоспалительных факторов ИЛ-6 и ИФН- γ и регуляции продукции противовоспалительного цитокина ИЛ-10 путем ингибирования провоспалительных сигнальных путей NF- κ B и митоген-активируемой протеинкиназы (MAPK). Обогащение спирулины селеном усиливает ее противовоспалительный эффект путем снижения *in vitro* уровня цитокинов, таких как ИЛ-6, ИЛ-1 β и ФНО α , что свидетельствует о перспективе использования спирулины для профилактики и лечения воспалительных заболеваний [39].

В настоящее время активно изучается вопрос антиканцерогенного действия спирулины и ее биологически активных компонентов. Антиканцерогенный потенциал спирулины в основном представлен в исследованиях *in vitro* на культурах клеток рака легких человека, рака молочной железы, гепатоцеллюлярной карциномы, миелоидного лейкоза и др. и заключается в ее способности подавлять рост опухоли, блокируя клеточный цикл в фазе G₂, предотвращая пролиферацию раковых клеток и индуцируя апоптоз посредством активации каспаз и ингибируя пути самосохранения, опосредованные ядерным фактором NF- κ B [40, 41]. Фикоцианин продемонстрировал более высокую эффективность против нескольких видов рака благодаря способности снижать окислительный стресс и воспаление, являющиеся 2 критическими факторами в прогрессировании онкопатологии [42, 43]. В целом биологически активные вещества спирулины действуют как антиканцерогенные агенты, ингибируя пролиферацию опухолевых клеток, запуская остановку клеточного цикла и индуцируя апоптоз посредством различных сигнальных путей. Кроме того, эти соединения блокируют ангиогенез (образование новых кровеносных сосудов, снабжающих опухоль), проявляют антиоксидантную и антиметастатическую активность [44].

Индукцированное ожирением метавоспаление, окислительный стресс, инсулинорезистентность, дислипидемия являются основными патогенетическими факторами развития различных заболеваний, включающих сахарный диабет 2 типа, сердечно-сосудистые заболевания, метаболический синдром, нарушения опорно-двигательного аппарата и аутоиммунные заболевания. Поэтому коррекция иммунорегуляторных механизмов метавоспаления является приоритетным направлением профилактики и терапии. Имеются доказательства наличия потенциальных противодиабетических эффектов спирулины, проявляющихся улучшением гликемического контроля и моду-

лированием липидных профилей. Было показано, что ключевые биоактивные соединения, такие как фикоцианин, полисахариды и γ -линоленовая кислота, регулируют уровень глюкозы в крови [4]. Фикоцианин, содержащийся в спирулине, способен ингибировать фермент НАДФН-оксидазу, основной компонент окислительного стресса в адипоцитах, играющий главную роль в изменении продукции адипокинов и цитокинов в гипертрофированных адипоцитах и развитии инсулинорезистентности. Таким образом, подавляя окислительный стресс адипоцитов, спирулина может оказывать системное противовоспалительное и инсулиносенсибилизирующее действие [4].

Влияние спирулины на тяжесть метаболического синдрома показано в систематическом обзоре [37]. Получены доказательства положительного влияния перорального приема спирулины в дозе от 1 до 19 г/сут в течение 0,5–6 мес пациентами с метаболическим синдромом. Добавление в рацион продуктов из спирулины позитивно влияло на регуляцию обмена липидов и глюкозы. Одним из факторов, способствующих улучшению метаболизма глюкозы при приеме спирулины, является высокое содержание в ней пищевых волокон и белка, что обеспечивает снижение усвоения глюкозы. После употребления спирулины также повышается чувствительность тканей к инсулину. Это объясняется снижением в сыворотке крови уровня ИЛ-6, который стимулирует механизмы, ингибирующие субстрат инсулинового рецептора, с последующей супрессией транслокации транспортера глюкозы типа 4 (GLUT-4) на поверхность клетки и уменьшением поглощения глюкозы клетками мышечной и жировой ткани. В частности, отмечено, что употребление спирулины пожилыми людьми по 8 г/сут в течение 16 нед приводит к повышению в плазме крови концентрации ИЛ-2, снижению уровня ИЛ-6 и росту содержания адипонектина. При этом значительно увеличивается соотношение ИЛ-2/ИЛ-6, что свидетельствует об улучшении иммунного статуса.

Спирулина также известна своими гиполипидемическими свойствами. Потребление спирулины по 4,5 г/сут в течение 6 нед 36 добровольцами (16 мужчин и 20 женщин в возрасте от 18 до 65 лет) приводило к снижению общего уровня холестерина, холестерина липопротеинов низкой плотности и триглицеридов, при этом повышался уровень холестерина липопротеинов высокой плотности [45]. Эти эффекты в значительной степени обеспечиваются фикоцианинами и γ -линоленовой кислотой, которые участвуют в регуляции липидного обмена и предотвращают накопление липидов в кровеносных сосудах, что способствует профилактике атеросклероза и других сердечно-сосудистых заболеваний [46, 47].

Результаты экспериментальных исследований нейронных головного мозга на различных экспериментальных моделях *in vivo* от нейровоспаления до нейродегенерации, включая болезни Альцгеймера и Паркинсона, свидетельствуют о возможности использования спирулины в качестве нейропротекторного компонента, обладающего антиоксидантной и противовоспалительной активностью [48–50]. Положительное воздействие

спирулины на центральную нервную систему также обусловлено взаимодействием между фитокомплексом спирулины и кишечной микробиотой с образованием оси «кишечник–мозг» [51]. Спирулина и кишечная микробиота взаимодействуют в обоих направлениях. С одной стороны, микробиота трансформирует фитокомплекс в минорные биологически активные вещества, которые способны пересекать гематоэнцефалический барьер и оказывать воздействие на синтез нейротрансмиттеров (дофамин, серотонин, глицин, глутамат/гамма-аминомасляная кислота), что приводит к улучшению когнитивных функций и памяти. С другой стороны, спирулина повышает биологическую активность и численность нормальной микрофлоры кишечника [52].

Имеются данные о противовоспалительном воздействии спирулины и С-фикоцианина на клетки микроглии (резидентные макрофаги центральной нервной системы) и астроциты. С-фикоцианин, аллофикоцианин и фикоэритрин являются наиболее распространенными фикобилипротеинами в цианобактериях. Противовоспалительная способность фикобилипротеинов основана на ингибировании экспрессии генов, ответственных за воспаление, и подавлении цитотоксичности микроглии при некоторых нейродегенеративных заболеваниях, таких как болезнь Альцгеймера и болезнь Паркинсона [50, 53]. Как известно, при нейродегенеративных заболеваниях активированные микроглиальные клетки экспрессируют провоспалительные цитокины, хемокины и другие медиаторы воспаления, такие как ФНО α , ИЛ-1 β , ИЛ-6 и -8, макрофагальные воспалительные белки MIP-1 α и MIP-1 β , а также АФК, вызывая нарушения мозговой деятельности.

Опубликованы результаты исследования *in vivo*, свидетельствующие о применении спирулины в качестве эффективного нейропротекторного средства при ишемическом инсульте [54]. В исследовании представлен протективный эффект спирулины при фокальной церебральной ишемии-реперфузии, вызванной транзиторной окклюзией средней мозговой артерии у крыс. Потребление крысами спирулины в дозе 180 мг на 1 кг массы тела значительно снизило повышенное содержание малонового диальдегида и восстановило активность супероксиддисмутазы, каталазы и уровень восстановленного глутатиона в мозге, что свидетельствует о защитном антиоксидантном потенциале спирулины при церебральной ишемии. Применение фикоцианобилина привело к нормализации окислительного дисбаланса в головном мозге и сыворотке крови ишемизированных животных. Примечательно, что фикоцианобилин эффективно модулировал экспрессию генов цитокинов: ИФН- γ , ИЛ-6, CD74, Foxp3, TGF- β , CCL12, ИЛ-4, ИЛ-17A, C/EBP β , CXCL2, ICAM-1, ИЛ-1 β и ФНО α , вовлеченных в воспалительный ответ на ранней стадии после ишемического инсульта [55].

Таким образом, спирулина представляет собой важный источник нейропротекторных ингредиентов, применение которых в профилактической терапии требует дополнительных клинических и других масштабных контролируемых исследований.

Имеются доказательства положительного влияния внутрижелудочного введения в течение 5 нед *Arthrospira maxima* (1 г/кг в сутки) и С-фикоцианина (100 мг/кг в сутки) при почечной недостаточности на модели нефрэктомии у крыс *in vivo* [56]. Протективный эффект заключался в улучшении почечной функции: снижении протеинурии, нормализации клиренса креатинина и уменьшении концентрации мочевой кислоты в сыворотке крови. При этом у крыс обнаружено снижение систолического артериального давления с предотвращением развития гипертрофии левого желудочка. По мнению авторов, данные эффекты свидетельствуют о наличии антиоксидантных и противовоспалительных свойств спирулины и фикоцианина.

Применение антиоксидантов в офтальмологии обосновано тем, что ткань сетчатки глаза подвержена окислительному стрессу с образованием АФК в результате интенсивных метаболических процессов [57]. Образование АФК происходит преимущественно в митохондриальной дыхательной цепи, а также в результате ряда ферментативных и окислительных реакций, происходящих в нейросенсорной сетчатке и ретинальном пигментном эпителии. Протективный эффект 4-недельного обогащения спирулиной (20%) стандартного рациона мышей линии BALB/cAJc в эксперименте *in vivo* на светоиндуцированное ухудшение зрительной функции и повреждение фоторецепторов сетчатки глаза свидетельствует о перспективе использования спирулины для профилактики и терапии повреждений сетчатки глаза и прогрессирования заболеваний, таких как возрастная макулярная дегенерация [58].

Мезенхимальные стволовые клетки широко используются для лечения многих заболеваний, в том числе для восстановления повреждений костей. Установлено активирующее влияние белков, белковых лизатов и пептидных фракций, выделенных из спирулины, на пролиферацию и остеогенную дифференцировку человеческих амниотических мезенхимальных стволовых клеток [59]. Исследование *in vitro* подтверждает эффективность применения экстракта спирулины в качестве антиоксиданта, антимикробного и ростового фактора для усиления пролиферации мезенхимальных стволовых клеток, полученных из костного мозга крыс [60].

Заключение

Спирулина широко используется в качестве пищевого ингредиента, обладающего высокой пищевой ценностью. Актуальность применения спирулины в клинике возросла в связи с накоплением результатов научных исследований *in vitro* и *in vivo* биологически активных веществ цианобактерии, подтверждающих их иммуномодулирующее, антиоксидантное, противовоспалительное, противовирусное, антиканцерогенное, гипогликемическое и гиполипидемическое действие. Таким образом, имеется значительный потенциал для расширения клинических исследований по применению инновационных пищевых продуктов направленной эффективности, включающих спирулину и/или ее биологически активные вещества, в качестве функциональных пищевых ингредиентов.

Сведения об авторах

Трушина Элеонора Николаевна (Eleonora N. Trushina) – кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией иммунологии ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (Москва, Российская Федерация)

E-mail: trushina@ion.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0035-3629>

Ригер Николай Александрович (Nikolay A. Rieger) – доктор медицинских наук, профессор, главный специалист ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (Москва, Российская Федерация)

E-mail: rieger_63@mail.ru, riger@ion.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7149-2485>

Никитюк Дмитрий Борисович (Dmitry B. Nikityuk) – академик РАН, доктор медицинских наук, профессор, директор ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», профессор кафедры оперативной хирургии и топографической анатомии ИПО ФGAOY BO Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), профессор кафедры экологии и безопасности пищи ФGAOY BO РУДН им. Патриса Лумумбы (Москва, Российская Федерация)

E-mail: dimitrynik@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4968-4517>

Литература

- Maddiboyina B., Vanamamalai H.K., Roy H., Ramaiah C., Gandhi S., Kavisri M. et al. Food and drug industry applications of microalgae *Spirulina platensis*: a review // J. Basic Microbiol. 2023. Vol. 63, N 6. P. 573–583. DOI: <https://doi.org/10.1002/jobm.202200704>
- Spínola M.P., Mendes A.R., Prates J.A.M. Chemical composition, bioactivities, and applications of *Spirulina* (*Limnospira platensis*) in food, feed, and medicine // Foods. 2024. Vol. 13, N 22. P. 3656. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13223656>
- Valente L.M.P., Cabrita A.R.J., Maia M.R.G., Valente I.M., Engrola S., Fonseca A.J.M. et al. Chapter 9. Microalgae as feed ingredients for livestock production and aquaculture // Microalgae: Cultivation, Recovery of Compounds and Applications / ed. C.M. Galanakis. Academic Press, 2021. P. 239–312. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821218-9.00009-8> ISBN: 9780128212189.
- Anvar A.A., Nowruzi B. Bioactive properties of *Spirulina*: a review // Microb. Bioact. 2021. Vol. 4, N 1. P. 134–142. DOI: <https://doi.org/10.25163/microbbioacts.412117B0719110521>
- Calella P., Cerullo G., Di Dio M., Liguori F., Di Onofrio V., Galle F. et al. Antioxidant, anti-inflammatory and immunomodulatory effects of spirulina in exercise and sport: a systematic review // Front.

- Nutr. 2022. Vol. 9. Article ID 1048258. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1048258>
6. Ai X., Yu P., Li X., Lai X., Yang M., Liu F. et al. Polysaccharides from *Spirulina platensis*: Extraction methods, structural features and bioactivities diversity // *Int. J. Biol. Macromol.* 2023. Vol. 231. Article ID 123211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123211>
 7. Шипелин В.А., Холина А.В., Замятина А.В., Мазо В.К., Никитюк Д.Б. Влияние фикоцианинов из *Arthrospira platensis* на эффективность иммунизации противокоронавирусной вакциной in vivo // *Вопросы питания.* 2025. Т. 94, № 1. С. 118–130. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-1-118-130>
 8. AlFadhly N.K.Z., Alhelfi N., Altemimi A.B., Verma D.K., Cacciola F., Narayanankutty A. trends and technological advancements in the possible food applications of *Spirulina* and their health benefits: a review // *Molecules.* 2022. Vol. 27, N 17. P. 5584. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27175584>
 9. Spínola M.P., Costa M.M., Prates J.A.M. Digestive constraints of *Arthrospira platensis* in poultry and swine feeding // *Foods.* 2022. Vol. 11. P. 2984. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11192984>
 10. Bortolini D.G., Maciel G.M., Fernandes I.A.A., Pedro A.C., Rubio F.T.V., Branco I.G. et al. Functional properties of bioactive compounds from *Spirulina* spp.: current status and future trends // *Food Chem. Mol. Sci.* 2022. Vol. 5. Article ID 100134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100134>
 11. Chen W., Xu J., Yu Q., Yuan Z., Kong X., Sun Y. et al. Structural insights reveal the effective *Spirulina platensis* cell wall dissociation methods for multi-output recovery // *Bioresour. Technol.* 2020. Vol. 300. Article ID 122628. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122628>
 12. Chaiklahan R., Chirasuwan N., Srinorasing T., Attasat S., Noparatana A., Bunnag B. Enhanced biomass and phycocyanin production of *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* by a cultivation management strategy: light intensity and cell concentration // *Bioresour. Technol.* 2022. Vol. 343. Article ID 126077. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126077>
 13. Janda-Milczarek K., Szymczykowski K., Jakubczyk K., Kupnicka P., Skonieczna-Żydecka K.B. et al. *Spirulina* supplements as a source of mineral nutrients in the daily diet // *Appl. Sci.* 2023. Vol. 13. P. 1011. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13021011>
 14. Sinetova M.A., Kupriyanova E.V., Los D.A. *Spirulina*/*Arthrospira*/*Limnospira* – three names of the single organism // *Foods.* 2024. Vol. 13, N 17. P. 2762. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13172762>
 15. Liestianty D., Rodianawat I., Arfah R.A., Assa A., Patimah, Sundari et al. Nutritional analysis of *Spirulina* sp. to promote as superfood candidate // *Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Semarang, Indonesia, 2019.* Vol. 509. Article ID 012031. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/509/1/012031>
 16. Moradi S., Foshati S., Poorbaferani F., Talebi S., Bagheri R., Amirian P. et al. The effects of spirulina supplementation on serum iron and ferritin, anemia parameters, and fecal occult blood in adults with ulcerative colitis: a randomized, double-blinded, placebo-controlled trial // *Clin. Nutr. ESPEN.* 2023. Vol. 57. P. 755–763. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2023.08.019>
 17. Singh D.P., Prabha R., Verma S., Meena K.K., Yandigeri M. Antioxidant properties and polyphenolic content in terrestrial cyanobacteria // *3 Biotech.* 2017. Vol. 7, N 2. P. 134. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0786-6> Epub 2017 Jun 8.
 18. Guldass M., Ziyank-Demirtas S., Sahan Y., Yildiz E., Gurbuz O. Antioxidant and anti-diabetic properties of *Spirulina platensis* produced in Turkey // *Food Sci. Technol.* 2020. Vol. 41. P. 615–625. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.23920>
 19. Grover P., Bhatnagar A., Kumari N., Narayan Bhatt A., Kumar Nishad D., Purkayastha J. C-Phycocyanin – a novel protein from *Spirulina platensis* – in vivo toxicity, antioxidant and immunomodulatory studies // *Saudi J. Biol. Sci.* 2021. Vol. 28, N 3. P. 1853–1859. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.12.037>
 20. Silva N.C., Graton I.S., Duarte C.R., Barrozo M.A.S. Effects of infrared and microwave radiation on the bioactive compounds of microalga *Spirulina platensis* after continuous and intermittent drying // *Molecules.* 2023. Vol. 28. P. 5963. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28165963>
 21. Fais G., Manca A., Bolognesi F., Borselli M., Concas A., Busutti M. et al. Wide range applications of *Spirulina*: from earth to space missions // *Mar. Drugs.* 2022. Vol. 20, N 5. P. 299. DOI: <https://doi.org/10.3390/md20050299>
 22. Naeini F., Zarezadeh M., Mohiti S., Tutunchi H., Ebrahimi Mamaghani M., Ostadrahimi A. *Spirulina* supplementation as an adjuvant therapy in enhancement of antioxidant capacity: a systematic review and meta-analysis of controlled clinical trials // *Int. J. Clin. Pract.* 2021. Vol. 75. Article ID e14618. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijcp.14618>
 23. Finamore A., Palmery M., Bensechaila S., Peluso I. Antioxidant, immunomodulating, and microbial-modulating activities of the sustainable and ecofriendly *Spirulina* // *Oxid. Med. Cell. Longev.* 2017. Vol. 2017. Article ID 3247528. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/3247528>
 24. Mao T.K., van de Water J., Gershwin M.E. Effects of a *Spirulina*-based dietary supplement on cytokine production from allergic rhinitis patients // *J. Med. Food.* 2005. Vol. 8. P. 27–30. DOI: <https://doi.org/10.1089/jmf.2005.8.27>
 25. Carbone D.A., Pellone P., Lubritto C., Ciniglia C. Evaluation of microalgae antiviral activity and their bioactive compounds // *Antibiotics.* 2021. Vol. 10. P. 746. DOI: <https://doi.org/10.3390/antibiotics10060746>
 26. Ratha S.K., Renuka N., Rawat I., Bux F. Prospective options of algae-derived nutraceuticals as supplements to combat COVID-19 and human coronavirus diseases // *Nutrition.* 2021. Vol. 83. Article ID 111089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nut.2020.111089>
 27. Abd El-Baky H.H., El-Baroty G.S. *Spirulina maxima* L-asparaginase: immobilization, antiviral and antiproliferation activities // *Recent Pat. Biotechnol.* 2020. Vol. 14, N 2. P. 154–163. DOI: <https://doi.org/10.2174/1872208313666191114151344>
 28. Abdel-Moneim A.-M.E., Shehata A.M., Selim D.A., El-Saadony M.T., Mesalam N.M., Saleh A.A. *Spirulina platensis* and biosynthesized selenium nanoparticles improve performance, antioxidant status, humoral immunity and dietary and ileal microbial populations of heat-stressed broilers // *J. Therm. Biol.* 2022. Vol. 104. Article ID 103195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2022.103195>
 29. Alshuniaber M.A., Krishnamoorthy R., AlQhtani W.H. Antimicrobial activity of polyphenolic compounds from *Spirulina* against food-borne bacterial pathogens // *Saudi J. Biol. Sci.* 2021. Vol. 28, N 1. P. 459–464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.10.029>
 30. Cai B., Zhao X., Luo L., Wan P., Chen H., Pan J. Structural characterization, and in vitro immunostimulatory and antitumor activity of an acid polysaccharide from *Spirulina platensis* // *Int. J. Biol. Macromol.* 2022. Vol. 196. P. 46–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.062>
 31. Wu X., Liu Z., Liu Y., Yang Y., Shi F., Cheong K.L. et al. Immunostimulatory effects of polysaccharides from *spirulina platensis* in vivo and vitro and their activation mechanism on RAW246.7 macrophages // *Mar. Drugs.* 2020. Vol. 18, N 11. P. 538. DOI: <https://doi.org/10.3390/md18110538>
 32. Wu Q., Liu L., Miron A., Klímová B., Wan D., Kuča K. The antioxidant, immunomodulatory, and anti-inflammatory activities of *Spirulina*: an overview // *Arch. Toxicol.* 2016. Vol. 90, N 8. P. 1817–1840. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1744-5>
 33. Gromek W., Kołdej N., Kurowski M., Majsiak E. *Spirulina* (*Arthrospira platensis*): antiallergic agent or hidden allergen? A literature review // *Foods.* 2024. Vol. 13. P. 1052. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13071052>
 34. Bax C.E., Chakka S., Concha J.S., Zeidi M., Werth V.P. The effects of immunostimulatory herbal supplements on autoimmune skin diseases // *J. Am. Acad. Dermatol.* 2021. Vol. 84, N 4. P. 1051–1058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2020.06.037>
 35. Martins T., Barros A.N., Rosa E., Antunes L. Enhancing health benefits through chlorophylls and chlorophyll-rich agro-food: a comprehensive review // *Molecules.* 2023. Vol. 28. P. 5344. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28145344>
 36. Бирюлина Н.А., Мазо В.К., Багрянцева О.В. Фикоцианины *Arthrospira platensis*: перспективы использования в специализированной пищевой продукции (краткий обзор) // *Вопросы питания.* 2022. Т. 91, № 6. С. 30–36. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-6-30-36>
 37. Yousefi R., Saidpour A., Mottaghi A. The effects of *Spirulina* supplementation on metabolic syndrome components, its liver manifestation and related inflammatory markers: a systematic review // *Complement. Ther. Med.* 2019. Vol. 42. P. 137–144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2018.11.013>
 38. Li Y. The bioactivities of phycocyanobilin from *Spirulina* // *J. Immunol. Res.* 2022. Vol. 2022. Article ID 4008991. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/4008991>
 39. Jiang P., Meng J., Zhang L., Huang L., Wei L., Bai Y. et al. Purification and anti-inflammatory effect of selenium-containing protein fraction from selenium-enriched *Spirulina platensis* // *Food Biosci.* 2022. Vol. 45. Article ID 101469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101469>
 40. Tajvidi E., Nahavandizadeh N., Pournaderi M., Pourrashid A.Z., Bossaghzadeh F., Khoshnood Z. Study the antioxidant effects of blue-green algae *Spirulina* extract on ROS and MDA production in human lung cancer cells // *Biochem. Biophys. Rep.* 2021. Vol. 28. Article ID 101139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2021.101139>
 41. Subramaiam H., Chu W.L., Radhakrishnan A.K., Chakravarthi S., Selvaduray K.R., Kok Y.Y. Evaluating anticancer and immunomodulatory effects of *spirulina* (*Arthrospira*) *platensis* and gamma-tocotrienol supplementation in a syngeneic mouse model of breast cancer // *Nutrients.* 2021. Vol. 13. P. 2320. DOI: <https://doi.org/10.3390/nut13072320>
 42. Fernandes R., Campos J., Serra M., Fidalgo J., Almeida H., Casas A. et al. Exploring the benefits of phycocyanin: from *Spirulina* cultivation to its widespread applications // *Pharmaceuticals.* 2023. Vol. 16. P. 592. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph16040592>
 43. Jiang L., Wang Y., Yin Q., Liu G., Liu H., Huang Y. et al. Phycocyanin: a potential drug for cancer treatment // *J. Cancer.* 2017. Vol. 8. P. 3416–3429. DOI: <https://doi.org/10.7150/jca.21058>
 44. Silva M.R.O. da, Silva G.M. da, Silva A.L. da, Lima L.R. da, Bezerra R.P., Marques D.A. da. Bioactive compounds of *Arthrospira* spp. (*Spirulina*) with potential anticancer activities: a systematic review // *ACS*

- Chem. Biol. 2021. Vol. 16. P. 2057–2067. DOI: <https://doi.org/10.1021/acscchembio.1c00568>
45. Torres-Duran P.V., Ferreira-Hermosillo A., Juarez-Oropeza M.A. Antihyperlipemic and antihypertensive effects of *Spirulina maxima* in an open sample of Mexican population: a preliminary report // *Lipids Health Dis.* 2007. Vol. 6. P. 33. DOI: <https://doi.org/10.1186/1476-511X-6-33>
 46. Prete V., Abate A.C., Di Pietro P., De Lucia M., Vecchione C., Carrizzo A. Beneficial effects of *Spirulina* supplementation in the management of cardiovascular diseases // *Nutrients.* 2024. Vol. 16. P. 642. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu16050642>
 47. Мазо В.К., Бирюлина Н.А., Сидорова Ю.С. *Arthrospira platensis*: антиоксидантные, гипогликемические и гиполипидемические эффекты in vitro и in vivo (краткий обзор) // *Вопросы питания.* 2022. Т. 91, № 4. С. 19–25. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-4-19-25>
 48. Moradi-Kor N., Ghanbari A., Rashidipour H., Bandegi A.R., Yousefi B., Barati M. et al. Therapeutic effects of *spirulina platensis* against adolescent stress-induced oxidative stress, brain-derived neurotrophic factor alterations and morphological remodeling in the amygdala of adult female rats // *J. Exp. Pharmacol.* 2020. Vol. 12. P. 75. DOI: <https://doi.org/10.2147/JEP.S237378>
 49. Sinha S., Patro N., Tiwari P., Patro I.K. Maternal *Spirulina* supplementation during pregnancy and lactation partially prevents oxidative stress, glial activation and neuronal damage in protein malnourished F1 progeny // *Neurochem. Int.* 2020. Vol. 141. Article ID 104877. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuint.2020.104877>
 50. Hannan M.A., Dash R., Haque M.N., Mohibbullah M., Sohag A.A.M., Rahman M.A. et al. Neuroprotective potentials of marine algae and their bioactive metabolites: pharmacological insights and therapeutic advances // *Mar. Drugs.* 2020. Vol. 18. P. 347. DOI: <https://doi.org/10.3390/md18070347>
 51. Morais L.H., Schreiber H.L., Mazmanian S.K. The gut microbiota-brain axis in behaviour and brain disorders // *Nat. Rev. Microbiol.* 2021. Vol. 19, N 4. P. 241–255. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41579-020-00460-0>
 52. Sorrenti V., Castagna D.A., Fortinguerra S., Buriani A., Scapagnini G., Willcox D.C. *Spirulina* microalgae and brain health: a scoping review of experimental and clinical evidence // *Mar. Drugs.* 2021. Vol. 19. P. 293. DOI: <https://doi.org/10.3390/md19060293>
 53. Lima F.A.V., Joventino I.P., Joventino F.P., de Almeida A.C., Neves K.R.T., do Carmo M.R. Neuroprotective activities of *Spirulina platensis* in the 6-OHDA model of Parkinson's disease are related to its anti-inflammatory effects // *Neurochem. Res.* 2017. Vol. 42. P. 3390–3400. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11064-017-2379-5>
 54. Thaakur S., Sravanthi R. Neuroprotective effect of *Spirulina* in cerebral ischemia-reperfusion injury in rats // *J. Neural Transm. (Vienna).* 2010. Vol. 117, N 9. P. 1083–1091. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00702-010-0440-5>
 55. Pentón-Rol G., Marín-Prida J., McCarty M.F. C-Phycocyanin-derived phycocyanobilin as a potential nutraceutical approach for major neurodegenerative disorders and COVID-19-induced damage to the nervous system // *Curr. Neuropharmacol.* 2021. Vol. 19, N 12. P. 2250–2275. DOI: <https://doi.org/10.2174/1570159X19666210408123807>
 56. Memije-Lazaro I.N., Blas-Valdivia V., Franco-Colín M., Cano-Europa E. *Arthrospira maxima* (*Spirulina*) and C-phycocyanin prevent the progression of chronic kidney disease and its cardiovascular complications // *J. Funct. Foods.* 2018. Vol. 43. P. 37–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.01.013>
 57. Wang P., Chin E.K., Almeida D. Antioxidants for the treatment of retinal disease: summary of recent evidence // *Clin. Ophthalmol.* 2021. Vol. 15. P. 1621–1628. DOI: <https://doi.org/10.2147/OPTH.S307009>
 58. Okamoto T., Kawashima H., Osada H., Toda E., Homma K., Nagai N. et al. Dietary *Spirulina* supplementation protects visual function from photostress by suppressing retinal neurodegeneration in mice // *Transl. Vis. Sci. Technol.* 2019. Vol. 8, N 6. P. 20. DOI: <https://doi.org/10.1167/tvst.8.6.20>
 59. Moradi F., Hadavi M., Aghamaali M.R., Fallah S.F. Beneficial effects of bioactive peptides extracted from *Spirulina platensis* and *Gracilaria gracilis* algae on bone regeneration/osteogenic differentiation of mesenchymal stem cells // *Tissue Cell.* 2024. Vol. 89. Article ID 102430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tice.2024.102430>
 60. Saberian M., Delshad E.S. The role of *Spirulina platensis* on the proliferation of rat bone marrow-derived mesenchymal stem cells // *Iran. J. Microbiol.* 2023. Vol. 15, N 1. P. 111–120. DOI: <https://doi.org/10.18502/ijm.v15i1.11925>

References

1. Maddiboyina B., Vanamamalai H.K., Roy H., Ramaiah C., Gandhi S., Kavirasi M., et al. Food and drug industry applications of microalgae *Spirulina platensis*: a review. *J Basic Microbiol.* 2023; 63 (6): 573–83. DOI: <https://doi.org/10.1002/jobm.202200704>
2. Spínola M.P., Mendes A.R., Prates J.A.M. Chemical composition, bioactivities, and applications of *Spirulina* (*Limnospira platensis*) in food, feed, and medicine. *Foods.* 2024; 13 (22): 3656. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13223656>
3. Valente L.M.P., Cabrita A.R.J., Maia M.R.G., Valente I.M., Engrola S., Fonseca A.J.M., et al. Chapter 9. Microalgae as feed ingredients for livestock production and aquaculture. In: C.M. Galanakis (ed.). *Microalgae: Cultivation, Recovery of Compounds and Applications.* Academic Press, 2021: 239–312. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821218-9.00009-8> ISBN: 9780128212189.
4. Anvar A.A., Nowruzi B. Bioactive properties of *Spirulina*: a review. *Microb Bioact.* 2021; 4 (1): 134–42. DOI: <https://doi.org/10.25163/microbioacts.412117B0719110521>
5. Calella P., Cerullo G., Di Dio M., Liguori F., Di Onofrio V., Galle F., et al. Antioxidant, anti-inflammatory and immunomodulatory effects of *spirulina* in exercise and sport: a systematic review. *Front Nutr.* 2022; 9: 1048258. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1048258>
6. Ai X., Yu P., Li X., Lai X., Yang M., Liu F., et al. Polysaccharides from *Spirulina platensis*: Extraction methods, structural features and bioactivities diversity. *Int J Biol Macromol.* 2023; 231: 123211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123211>
7. Shipelin V.A., Kholina A.V., Zamyatina A.V., Mazo V.K., Nikityuk D.B. The effect of phycocyanins from *Arthrospira platensis* on the efficacy of immunization with an anti-coronavirus vaccine in vivo. *Voprosy pitaniia* [Problems of Nutrition]. 2025; 94 (1): 118–30. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-1-118-130> (in Russian)
8. AlFadhly N.K.Z., Alhelfi N., Altemimi A.B., Verma D.K., Cacciola F., Narayanankutty A. trends and technological advancements in the possible food applications of *Spirulina* and their health benefits: a review. *Molecules.* 2022; 27 (17): 5584. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27175584>
9. Spínola M.P., Costa M.M., Prates J.A.M. Digestive constraints of *Arthrospira platensis* in poultry and swine feeding. *Foods.* 2022; 11: 2984. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11192984>
10. Bortolini D.G., Maciel G.M., Fernandes I.A.A., Pedro A.C., Rubio F.T.V., Branco I.G., et al. Functional properties of bioactive compounds from *Spirulina* spp.: current status and future trends. *Food Chem Mol Sci.* 2022; 5: 100134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100134>
11. Chen W., Xu J., Yu Q., Yuan Z., Kong X., Sun Y., et al. Structural insights reveal the effective *Spirulina platensis* cell wall dissociation methods for multi-output recovery. *Bioresour Technol.* 2020; 300: 122628. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122628>
12. Chaiklahan R., Chirasuwan N., Srinorasing T., Attasat S., Nopharatana A., Bunnag B. Enhanced biomass and phycocyanin production of *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* by a cultivation management strategy: light intensity and cell concentration. *Bioresour Technol.* 2022; 343: 126077. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126077>
13. Janda-Milczarek K., Szymczykowska K., Jakubczyk K., Kupnicka P., Skonieczna-Żydecka K.B., et al. *Spirulina* supplements as a source of mineral nutrients in the daily diet. *Appl Sci.* 2023; 13: 1011. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13021011>
14. Sinetova M.A., Kupriyanova E.V., Los D.A. *Spirulina/Arthrospira/Limnospira* – three names of the single organism. *Foods.* 2024; 13 (17): 2762. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13172762>
15. Liestianty D., Rodianawat I., Arfah R.A., Assa A., Patimah, Sundari, et al. Nutritional analysis of *Spirulina* sp. to promote as superfood candidate. In: *Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* Semarang, Indonesia, 2019; 509: 012031. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/509/1/012031>
16. Moradi S., Foshati S., Poorbaferani F., Talebi S., Bagheri R., Amirian P., et al. The effects of *spirulina* supplementation on serum iron and ferritin, anemia parameters, and fecal occult blood in adults with ulcerative colitis: a randomized, double-blinded, placebo-controlled trial. *Clin Nutr ESPEN.* 2023; 57: 755–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2023.08.019>
17. Singh D.P., Prabha R., Verma S., Meena K.K., Yandigeri M. Antioxidant properties and polyphenolic content in terrestrial cyanobacteria. *3 Biotech.* 2017; 7 (2): 134. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0786-6> Epub 2017 Jun 8.
18. Guldas M., Ziyank-Demirtas S., Sahan Y., Yildiz E., Gurbuz O. Antioxidant and anti-diabetic properties of *Spirulina platensis* produced in Turkey. *Food Sci Technol.* 2020; 41: 615–25. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.23920>
19. Grover P., Bhatnagar A., Kumari N., Narayan Bhatt A., Kumar Nishad D., Purkayastha J. C-Phycocyanin – a novel protein from *Spirulina platensis* – in vivo toxicity, antioxidant and immunomodulatory

- tory studies. Saudi J Biol Sci. 2021; 28 (3): 1853–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.12.037>
20. Silva N.C., Graton I.S., Duarte C.R., Barrozo M.A.S. Effects of infrared and microwave radiation on the bioactive compounds of microalgae *Spirulina platensis* after continuous and intermittent drying. Molecules. 2023; 28: 5963. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28165963>
 21. Fais G., Manca A., Bolognesi F., Borselli M., Concas A., Busutti M., et al. Wide range applications of *Spirulina*: from earth to space missions. Mar Drugs. 2022; 20 (5): 299. DOI: <https://doi.org/10.3390/md20050299>
 22. Naeini F., Zarezadeh M., Mohiti S., Tutunchi H., Ebrahimi Mamaghani M., Ostadrahimi A. *Spirulina* supplementation as an adjuvant therapy in enhancement of antioxidant capacity: a systematic review and meta-analysis of controlled clinical trials. Int J Clin Pract. 2021; 75: e14618. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijcp.14618>
 23. Finamore A., Palmery M., Bensehaila S., Peluso I. Antioxidant, immunomodulating, and microbial-modulating activities of the sustainable and ecofriendly *Spirulina*. Oxid Med Cell Longev. 2017; 2017: 3247528. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/3247528>
 24. Mao T.K., van de Water J., Gershwin M.E. Effects of a *Spirulina*-based dietary supplement on cytokine production from allergic rhinitis patients. J Med Food. 2005; 8: 27–30. DOI: <https://doi.org/10.1089/jmf.2005.8.27>
 25. Carbone D.A., Pellone P., Lubritto C., Ciniglia C. Evaluation of microalgae antiviral activity and their bioactive compounds. Antibiotics. 2021; 10: 746. DOI: <https://doi.org/10.3390/antibiotics10060746>
 26. Ratha S.K., Renuka N., Rawat I., Bux F. Prospective options of algae-derived nutraceuticals as supplements to combat COVID-19 and human coronavirus diseases. Nutrition. 2021; 83: 111089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nut.2020.111089>
 27. Abd El-Baky H.H., El-Baroty G.S. *Spirulina maxima* L-asparaginase: immobilization, antiviral and antiproliferation activities. Recent Pat Biotechnol. 2020; 14 (2): 154–63. DOI: <https://doi.org/10.2174/1872208313666191114151344>
 28. Abdel-Moneim A.-M.E., Shehata A.M., Selim D.A., El-Saadony M.T., Mesalam N.M., Saleh A.A. *Spirulina platensis* and biosynthesized selenium nanoparticles improve performance, antioxidant status, humoral immunity and dietary and ileal microbial populations of heat-stressed broilers. J Therm Biol. 2022; 104: 103195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2022.103195>
 29. Alshuniaber M.A., Krishnamoorthy R., AlQhtani W.H. Antimicrobial activity of polyphenolic compounds from *Spirulina* against food-borne bacterial pathogens. Saudi J Biol Sci. 2021; 28 (1): 459–64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.10.029>
 30. Cai B., Zhao X., Luo L., Wan P., Chen H., Pan J. Structural characterization, and in vitro immunostimulatory and antitumor activity of an acid polysaccharide from *Spirulina platensis*. Int J Biol Macromol. 2022; 196: 46–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.062>
 31. Wu X., Liu Z., Liu Y., Yang Y., Shi F., Cheong K.L., et al. Immunostimulatory effects of polysaccharides from *spirulina platensis* in vivo and vitro and their activation mechanism on RAW246.7 macrophages. Mar Drugs. 2020; 18 (11): 538. DOI: <https://doi.org/10.3390/md18110538>
 32. Wu Q., Liu L., Miron A., Klímová B., Wan D., Kuča K. The antioxidant, immunomodulatory, and anti-inflammatory activities of *Spirulina*: an overview. Arch Toxicol. 2016; 90 (8): 1817–40. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1744-5>
 33. Gromek W., Kołdej N., Kurowski M., Majsiak E. *Spirulina* (Arthrospira platensis): antiallergic agent or hidden allergen? A literature review. Foods. 2024; 13: 1052. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13071052>
 34. Bax C.E., Chakka S., Concha J.S., Zeidi M., Werth V.P. The effects of immunostimulatory herbal supplements on autoimmune skin diseases. J Am Acad Dermatol. 2021; 84 (4): 1051–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2020.06.037>
 35. Martins T., Barros A.N., Rosa E., Antunes L. Enhancing health benefits through chlorophylls and chlorophyll-rich agro-food: a comprehensive review. Molecules. 2023; 28: 5344. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28145344>
 36. Biryulina N.A., Mazo V.K., Bagryantseva O.V. Phycocyanins of *Arthrospira platensis*: prospects for use in specialized food products (brief review) Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]. 2022; 91 (6): 3–36. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-6-30-36> (in Russian)
 37. Yousefi R., Saidpour A., Mottaghi A. The effects of *Spirulina* supplementation on metabolic syndrome components, its liver manifestation and related inflammatory markers: a systematic review. Complement Ther Med. 2019; 42: 137–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2018.11.013>
 38. Li Y. The bioactivities of phycocyanobilin from *Spirulina*. J Immunol Res. 2022; 2022: 4008991. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/4008991>
 39. Jiang P., Meng J., Zhang L., Huang L., Wei L., Bai Y., et al. Purification and anti-inflammatory effect of selenium-containing protein fraction from selenium-enriched *Spirulina platensis*. Food Biosci. 2022; 45: 101469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101469>
 40. Tajvidi E., Nahavandizadeh N., Pournaderi M., Pourrashid A.Z., Bossaghzadeh F., Khoshnood Z. Study the antioxidant effects of blue-green algae *Spirulina* extract on ROS and MDA production in human lung cancer cells. Biochem Biophys Rep. 2021; 28: 101139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2021.101139>
 41. Subramaiam H., Chu W.L., Radhakrishnan A.K., Chakravarthi S., Selvaduray K.R., Kok Y.Y. Evaluating anticancer and immunomodulatory effects of *Spirulina* (Arthrospira) platensis and gamma-tocotrienol supplementation in a syngeneic mouse model of breast cancer. Nutrients. 2021; 13: 2320. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu13072320>
 42. Fernandes R., Campos J., Serra M., Fidalgo J., Almeida H., Casas A., et al. Exploring the benefits of phycocyanin: from *Spirulina* cultivation to its widespread applications. Pharmaceuticals. 2023; 16: 592. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph16040592>
 43. Jiang L., Wang Y., Yin Q., Liu G., Huang Y., et al. Phycocyanin: a potential drug for cancer treatment. J Cancer. 2017; 8: 3416–29. DOI: <https://doi.org/10.7150/jca.21058>
 44. Silva M.R.O. da, Silva G.M. da, Silva A.L. da, Lima L.R. da, Bezerra R.P., Marques D.A. da. Bioactive compounds of *Arthrospira* spp. (*Spirulina*) with potential anticancer activities: a systematic review. ACS Chem Biol. 2021; 16: 2057–67. DOI: <https://doi.org/10.1021/acscchembio.1c00568>
 45. Torres-Duran P.V., Ferreira-Hermosillo A., Juarez-Oropeza M.A. Antihyperlipemic and antihypertensive effects of *Spirulina maxima* in an open sample of Mexican population: a preliminary report. Lipids Health Dis. 2007; 6: 33. DOI: <https://doi.org/10.1186/1476-511X-6-33>
 46. Prete V., Abate A.C., Di Pietro P., De Lucia M., Vecchione C., Carizzo A. Beneficial effects of *Spirulina* supplementation in the management of cardiovascular diseases. Nutrients. 2024; 16: 642. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu16050642>
 47. Mazo V.K., Biryulina N.A., Sidorova Yu.S. *Arthrospira platensis*: antioxidant, hypoglycemic and hypolipidemic effects in vitro and in vivo (short review). Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]. 2022; 91 (4): 19–25. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-4-19-25> (in Russian)
 48. Moradi-Kor N., Ghanbari A., Rashidipour H., Bandegi A.R., Yousefi B., Barati M., et al. Therapeutic effects of *spirulina platensis* against adolescent stress-induced oxidative stress, brain-derived neurotrophic factor alterations and morphological remodeling in the amygdala of adult female rats. J Exp Pharmacol. 2020; 12: 75. DOI: <https://doi.org/10.2147/JEP.S237378>
 49. Sinha S., Patro N., Tiwari P., Patro I.K. Maternal *Spirulina* supplementation during pregnancy and lactation partially prevents oxidative stress, glial activation and neuronal damage in protein malnourished F1 progeny. Neurochem Int. 2020; 141: 104877. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuint.2020.104877>
 50. Hannan M.A., Dash R., Haque M.N., Mohibullah M., Sohag A.A.M., Rahman M.A., et al. Neuroprotective potentials of marine algae and their bioactive metabolites: pharmacological insights and therapeutic advances. Mar Drugs. 2020; 18: 347. DOI: <https://doi.org/10.3390/md18070347>
 51. Morais L.H., Schreiber H.L., Mazmanian S.K. The gut microbiota-brain axis in behaviour and brain disorders. Nat Rev Microbiol. 2021; 19 (4): 241–55. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41579-020-00460-0>
 52. Sorrenti V., Castagna D.A., Fortinguerra S., Buriani A., Scapagnini G., Willcox D.C. *Spirulina* microalgae and brain health: a scoping review of experimental and clinical evidence. Mar Drugs. 2021; 19: 293. DOI: <https://doi.org/10.3390/md19060293>
 53. Lima F.A.V., Joventino I.P., Joventino F.P., de Almeida A.C., Neves K.R.T., do Carmo M.R. Neuroprotective activities of *Spirulina platensis* in the 6-OHDA model of Parkinson's disease are related to its anti-inflammatory effects. Neurochem Res. 2017; 42: 3390–400. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11064-017-2379-5>
 54. Thakur S., Sravanthi R. Neuroprotective effect of *Spirulina* in cerebral ischemia-reperfusion injury in rats. J Neural Transm (Vienna). 2010; 117 (9): 1083–91. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00702-010-0440-5>
 55. Pentón-Rol G., Marín-Prida J., McCarty M.F. C-Phycocyanin-derived phycocyanobilin as a potential nutraceutical approach for major neurodegenerative disorders and COVID-19-induced damage to the nervous system. Curr Neuropharmacol. 2021; 19 (12): 2250–75. DOI: <https://doi.org/10.2174/1570159X19666210408123807>
 56. Memije-Lazaro I.N., Blas-Valdivia V., Franco-Colín M., Cano-Europa E. *Arthrospira maxima* (*Spirulina*) and C-phycocyanin prevent the progression of chronic kidney disease and its cardiovascular complications. J Funct Foods. 2018; 43: 37–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.01.013>
 57. Wang P., Chin E.K., Almeida D. Antioxidants for the treatment of retinal disease: summary of recent evidence. Clin Ophthalmol. 2021; 15: 1621–8. DOI: <https://doi.org/10.2147/OPHTH.S307009>
 58. Okamoto T., Kawashima H., Osada H., Toda E., Homma K., Nagai N., et al. Dietary *Spirulina* supplementation protects visual function from photostress by suppressing retinal neurodegeneration in mice. Transl Vis Sci Technol. 2019; 8 (6): 20. DOI: <https://doi.org/10.1167/tvst.8.6.20>
 59. Moradi F., Hadavi M., Aghamaali M.R., Fallah S.F. Beneficial effects of bioactive peptides extracted from *Spirulina platensis* and *Gracilaria gracilis* algae on bone regeneration/osteogenic differentiation of mesenchymal stem cells. Tissue Cell. 2024; 89: 102430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tice.2024.102430>
 60. Saberian M., Delshad E.S. The role of *Spirulina platensis* on the proliferation of rat bone marrow-derived mesenchymal stem cells. Iran J Microbiol. 2023; 15 (1): 111–20. DOI: <https://doi.org/10.18502/ijm.v15i1.11925>

Для корреспонденции

Барило Анна Александровна – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник лаборатории клинической патофизиологии Научно-исследовательского института медицинских проблем Севера – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН

Адрес: 660022, Российская Федерация, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, д. 3г

Телефон: (391) 228-06-81, (391) 228-06-83

E-mail: annomsk@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5349-9122>

Барило А.А., Смирнова С.В.

Клинический случай ассоциации пищевой и пыльцевой аллергии с акне

Clinical case of association of food and pollen allergy with acne

Barilo A.A., Smirnova S.V.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Научно-исследовательский институт медицинских проблем Севера, 660022, г. Красноярск, Российская Федерация

Scientific Research Institute of Medical Problems of the North, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», 660022, Krasnoyarsk, Russian Federation

Акне (угревая болезнь) – хроническое воспалительное заболевание сальных желез, характеризующееся избыточной выработкой кожного сала, фолликулярной гиперкератинизацией и воспалением кожи. Актуальность данного исследования обусловлена потребностью пациентов с угревой болезнью при обращении к врачам-дерматологам в получении рекомендаций по лечебному питанию. Данные о влиянии пищевой аллергии на развитие акне крайне немногочисленны, что также обуславливает актуальность проводимого исследования.

Целью исследования было представление клинического случая ассоциации у пациента пищевой аллергии с акне и сопутствующим поллинозом.

Материал и методы. Проведено специфическое аллергологическое обследование пациента в возрасте 15 лет, у которого в течение 3 лет выставлен диагноз акне: определение концентрации общего иммуноглобулина E (IgE), эозинофильного катионного протеина в сыворотке крови методом твердофазного иммуноферментного анализа, кожное prick-тестирование с пищевыми и пыльцевыми аллергенами.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы подтвердили отсутствие конфликта интересов.

Вклад авторов. Концепция и дизайн исследования – оба автора; сбор и обработка материала, написание текста – Барило А.А.; редактирование – Смирнова С.В.; ответственность за содержание и целостность всей статьи – оба автора.

Для цитирования: Барило А.А., Смирнова С.В. Клинический случай ассоциации пищевой и пыльцевой аллергии с акне // Вопросы питания. 2025. Т. 94, № 6. С. 90–96. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-90-96>

Статья поступила в редакцию 12.05.2025. **Принята в печать** 20.10.2025.

Funding. The study had no sponsorship.

Conflict of interest. The authors have declared no conflicts of interest.

Contribution. Study concept and design – both authors; data collection, processing, and writing the text – Barilo A.A.; editing – Smirnova S.V.; responsibility for the content and integrity of the entire article – both authors.

For citation: Barilo A.A., Smirnova S.V. Clinical case of association of food and pollen allergy with acne. Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]. 2025; 94 (6): 90–96. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-90-96> (in Russian)

Received 12.05.2025. **Accepted** 20.10.2025

Результаты. Исходное обследование показало повышенный уровень в сыворотке крови общего IgE (284 МЕ/мл при норме до 100 МЕ/мл) и эозинофильного катионного протеина (36 нг/мл, референсные значения: 0–24 нг/мл). В результате кожного prick-тестирования выявлена гиперергическая реакция (25 мм) к пыльце деревьев, положительная реакция (6–10 мм) к белкам пшеничной муки и овсяной крупе, белку молока, пыльце злаковых трав, яблоку, слабopоложительная реакция (3–5 мм) к томатам, белку ржаной муки. Через 2 мес отмечен положительный клинический эффект в результате назначения элиминационной диеты с учетом причинно-значимых и перекрестно-реагирующих аллергенов (в том числе с учетом общих антигенных детерминант) с исключением молочных продуктов, геркулеса, отрубей, овсяного печенья, крупяных каш, макаронных изделий, арахиса, всех видов копченых колбас, кофе, какао, мороженого, шербета, кунжута, сорго, меда и продуктов пчеловодства, клубники, земляники, цитрусовых, сои, щавеля, травяных чаев, плодов деревьев (сырые яблоки, косточковые – персики, вишня), а также орехов, сельдерея, сырой моркови, томатов, экзотических фруктов.

Заключение. Представленный случай демонстрирует необходимость проведения специфического аллергологического обследования пациентам с акне с сопутствующей сенсибилизацией к пыльцевым аллергенам в случае резистентности к проводимой стандартной терапии с целью подбора персонализированной элиминационной диеты с исключением причинно-значимых и перекрестно-реагирующих аллергенов.

Ключевые слова: акне; пищевая аллергия; аллергены; поллиноз; сенсибилизация; элиминационная диета

Acne is a chronic inflammatory disease of the sebaceous glands characterized by excessive sebum production, follicular hyperkeratinization, and skin inflammation. The relevance of this study stems from the need for acne patients to receive dietary recommendations when consulting dermatologists. Data on the influence of food allergies on acne development are extremely limited, making this study particularly relevant.

The aim of the study was to present a clinical case of association of food allergy with acne and concomitant hay fever in a patient.

Material and methods. A specific allergological examination was performed on a 15-year-old patient who had been diagnosed with acne for 3 years. The determination of the level of total immunoglobulin E (IgE), eosinophilic cationic protein in the blood serum by the method of solid-phase enzyme immunoassay, skin prick testing with food and pollen allergens were carried out.

Results. Increased serum levels of total IgE (284 IU/ml, reference values: 0–100 IU/ml) and eosinophil cationic protein (36 ng/ml, reference values: 0–24 ng/ml) were detected. Skin prick testing revealed a hyperergic reaction (25 mm) to tree pollen, a positive reaction (6–10 mm) to wheat flour and oatmeal proteins, milk protein, cereal pollen, and apples, and a weakly positive reaction (3–5 mm) to tomatoes and rye flour protein. After 2 months, a positive clinical effect was noted as a result of elimination diet prescribed taking into account the causative and cross-reactive allergens (including common antigenic determinants) with the exclusion of dairy products, rolled oats, bran, oatmeal cookies, cereal porridges, pasta, peanuts, all types of smoked sausages, coffee, cocoa, ice cream, sherbet, sesame, sorghum, honey and bee products, strawberries, citrus fruits, soy, sorrel, herbal teas, tree fruits (raw apples, peaches, cherries), as well as nuts, celery, raw carrots, tomatoes, exotic fruits.

Conclusion. The presented case demonstrates the need for a specific allergological examination of patients with acne with concomitant sensitization to pollen allergens in case of resistance to standard therapy in order to select a personalized elimination diet with the exclusion of causative and cross-reactive allergens.

Keywords: acne; food allergy; allergens; hay fever; sensitization; elimination diet

Акне (угревая болезнь) – хроническое воспалительное заболевание сальных желез, характеризующееся избыточной выработкой кожного сала (себума), фолликулярной гиперкератинизацией и воспалением кожи [1]. Поражение кожи при акне может привести к значительному психологическому воздействию, поскольку оно связано с проблемами психического здоровья, включая беспокойство, депрессию и снижение самооценки [2].

В связи с повышением роли питания в профилактике и лечении различных патологий растет потребность в изучении ее связи с таким распространенным кожным заболеванием, как акне [3]. Актуальность проведения данных исследований обусловлена потребностью пациентов с угревой болезнью при обращении к врачам-дерматологам в получении рекомендаций по лечебному питанию [4]. Однако оценка влияния роли питания на

тяжесть заболевания остается сложной из-за субъективного характера жалоб, недостаточности данных о пищевых привычках пациентов и отсутствия стандартизированных рекомендаций по питанию, специфичных для конкретных заболеваний. Поэтому актуальным остается вопрос об изучении связей между потреблением определенных пищевых продуктов и риском развития акне, что позволит получить ценную информацию для профилактических и терапевтических стратегий в дополнение к стандартной терапии, основанной на клинических рекомендациях [4].

Недавние исследования показали, что определенные факторы питания могут влиять на развитие и тяжесть акне [5]. Так, избыточное употребление простых углеводов, молока и молочных продуктов является диетическим триггером акне в связи с их ролью в повышении уровня инсулина – вырабатываемого поджелудочной железой гормона, который важен для регулирования уровня глюкозы в крови, и инсулиноподобного фактора роста 1 (IGF-1), вырабатываемого в основном печенью и участвующего в нескольких анаболических путях. Колебания уровня инсулина и IGF-1 могут влиять на увеличение выработки себума – одну из основных причин развития акне, а также стимулировать высвобождение провоспалительных молекул, которые способствуют развитию акне [6].

Данные о влиянии пищевой аллергии на развитие акне крайне немногочисленны. В проведенных нами ранее исследованиях выявлены сенсибилизация к определенным пищевым аллергенам данной категории пациентов и положительный эффект элиминации [7]. Поскольку пищевая аллергия является системным процессом, органами-мишенями которого служат желудочно-кишечный тракт и кожа, воспалительный процесс влияет на изменение микробиоценоза кишечника и повреждение кожи. В исследованиях отмечена связь между факторами питания, микробиомом кишечника и акне [8, 9]. Потребляемые пищевые продукты являются одними из основных факторов, определяющих состав и функцию микробиома кишечника, в результате чего изменение пищевого рациона значительно влияет на развитие и течение воспалительного процесса в коже [8, 10].

В связи с этим **целью** настоящего исследования было представление клинического случая ассоциации пищевой аллергии у пациента с акне и сопутствующим поллинозом.

Клинический случай

Anamnesis morbi. Под наблюдением находился пациент П., 15 лет, у которого в течение 3 лет выставлен диагноз акне. Пациент П. предъявлял жалобы на появление комедонов и многочисленных высыпаний на коже лица, плеч, спины и верхней трети груди в виде папул, пустул и узлов, умеренно болезненных при пальпации. Обращался к дерматологам. Местная терапия, назначенная согласно клиническим рекомендациям, не давала выраженного положительного эффекта.

Anamnesis vitae. Рос и развивался соответственно возрасту. Контакты с инфекционными больными отрицает. В детстве перенес ветряную оспу. Сопутствующие заболевания: поллиноз (сезонная аллергия на пыльцу березы) – с 10 лет ежегодно в мае отмечается рино-конъюнктивальный синдром (ринорея со слизистым отделяемым, частые чихания, покраснение и зуд век). Другой соматической патологии не выявлено. Наследственный анамнез по акне неотягощен.

Объективный статус: состояние средней степени тяжести, температура тела 36,6 °С. Зев спокоен, язык чистый, живот мягкий, безболезненный, дыхание везикулярное, хрипов нет, частота дыхательных движений – 17 в минуту, тоны сердца ясные, ритмичные, частота сердечных сокращений – 62 в минуту.

Status localis: патологический процесс носит распространенный характер с локализацией на коже лица, плеч, спины и верхней трети груди. Кожа лица с жирным блеском. Патологический процесс представлен многочисленными открытыми и закрытыми комедонами, фолликулярными пустулами и папулами. В области боковой поверхности щек – единичные воспалительные инфильтраты багрово-красного цвета в диаметре до 3 см с гнойным отделяемым, отеки, болезненные при пальпации.

Обоснование клинического диагноза

Диагноз выставлен на основании жалоб, данных анамнеза, характерной клинической картины заболевания.

Клинический диагноз

Основной: акне, папуло-пустулезная форма, тяжелое течение.

Сопутствующий: поллиноз. Сенсибилизация к пыльце березы и перекрестно-реагирующим пищевым аллергенам.

Проведенное обследование

Проведены следующие клинико-лабораторные исследования: развернутый биохимический анализ: общий белок, билирубин, аспартат- (АСТ) и аланинаминотрансфераза (АЛТ), холестерин, глюкоза, щелочная фосфатаза. В клиническом анализе крови показатели в пределах нормы. Отклонений в биохимических показателях крови (активность АЛТ, АСТ, щелочной фосфатазы, уровень общего белка, билирубина, холестерина, глюкозы) не выявлено. Анализ крови на гепатиты В и С, сифилис и ВИЧ-инфекцию отрицательные. Анализ кала на яйца глист трехкратно отрицательный. Общий анализ мочи без особенностей. По данным ультразвукового исследования брюшной полости патологии не выявлено.

При бактериоскопическом исследовании отделяемого содержимого пустул выделен *Staphylococcus aureus* 10⁴ КОЕ/мл.

Выявлено повышение в сыворотке крови уровня общего IgE – 284 МЕ/мл (референсные значения: 0–100 МЕ/мл) и эозинофильного катионного протеина – 36 нг/мл (референсные значения: 0–24 нг/мл).

Для выявления спектра сенсibilизации к пищевым и пыльцевым аллергенам выполнено кожное prick-тестирование («Микроген», Россия). За 7 дней до проведения кожного тестирования пациент не принимал антигистаминные препараты, топические и системные кортикостероиды. Результаты оценки кожного prick-тестирования приведены в таблице.

В результате кожного prick-тестирования на основании анализа размера волдырной реакции и гиперемии выявлена гиперергическая реакция (25 мм) к пыльце деревьев, положительная реакция (6–10 мм) – к белкам пшеничной муки и овсяной крупе, белку молока, пыльце злаковых трав, яблоку, слабopоложительная реакция (3–5 мм) – к томатам, белку ржаной муки.

С учетом данных бактериологического исследования пациенту была назначена системная антибактериальная терапия (миноциклин) в течение 6 нед. На фоне проводимой терапии у пациента отмечена слабopоложительная динамика течения патологического процесса: количество папул, пустул, узлов сократилось, однако полного регресса элементов не произошло, продолжали появляться новые воспалительные элементы. Учитывая длительность применения и недостаточную эффективность проводимой терапии, пациенту была отменена системная антибактериальная терапия и рекомендована индивидуальная диета с элиминацией причинно-значимых аллергенов (в том числе с учетом общих антигенных детерминант) на основании результатов кожного prick-тестирования. Местную терапию не назначали.

Пациенту П. была назначена элиминационная диета с исключением молочных продуктов (молоко, сливки, сметана, творог, сыр, кефир, йогурты, продукты с содержанием сухого молока в составе); рекомендовано исключить из рациона питания геркулес, отруби, овсяное печенье, крупяные каши, макаронные изделия, арахис, все виды копченых колбас, кофе, какао, мороженое, шербет, кунжут, сорго, мед и продукты пчеловодства, клубнику, землянику, цитрусовые, сою, щавель, травяные чаи, плоды деревьев (такие как сырые яблоки, косточковые – персики, вишня), а также орехи, сельдерей, сырую морковь, томаты, экзотические фрукты. Кроме того, даны рекомендации по исключению косметических средств, содержащих растительные компоненты (кремы для тела, гели для душа, шампуни). На период соблюдения индивидуальной элиминационной диеты разрешались к употреблению следующие продукты: мясо (индейка, курица, кролик, говядина, свинина, баранина), рыба (белые и красные сорта) и морепродукты, овощи (кроме бобовых, томатов, сырой моркови), фрукты (кроме сырого яблока, цитрусовых, персиков, вишни) и ягоды (кроме клубники и земляники), крупы (гречневая, рисовая), напитки (чай, компоты, морсы из неярко окрашенных фруктов), специи (соль, черный перец, лук, чеснок, лавровый лист).

Через 2 мес от начала соблюдения элиминационной диеты отмечен положительный эффект: полный регресс высыпаний на коже, отмечаются остаточные явления постакне в виде поствоспалительной пигментации (рис. 1–3).

Спектр сенсibilизации к пищевым и пыльцевым аллергенам пациента П. с акне методом кожного prick-тестирования

Spectrum of sensitization to food and pollen allergens of patient P. with acne using skin prick testing

Аллерген <i>Allergen</i>	Результат тестирования <i>Test result</i>
Коровье молоко / <i>Cow's milk</i>	++
Говядина / <i>Beef meat</i>	–
Желток куриного яйца / <i>Chicken egg yolk</i>	–
Белок куриного яйца / <i>Chicken egg protein</i>	–
Куриное яйцо (цельное) / <i>Chicken egg</i>	–
Мясо курицы / <i>Chicken</i>	–
Белок пшеничной муки / <i>Wheat flour protein</i>	++
Белок ржаной муки / <i>Rye flour protein</i>	+
Ячменная крупа / <i>Barley groats</i>	–
Овсяная крупа / <i>Oatmeal</i>	++
Рис / <i>Rice</i>	–
Гречка / <i>Buckwheat</i>	–
Яблоко / <i>Apple</i>	++
Дрожжи / <i>Yeasts</i>	–
Огурец / <i>Cucumber</i>	–
Томат / <i>Tomato</i>	+
Луговые травы / <i>Meadow grasses</i>	–
Деревья / <i>Trees</i>	++++
Сорные травы / <i>Weed grasses</i>	–
Злаковые травы / <i>Cereal grasses</i>	++

В представленном клиническом случае у пациента с акне отмечен положительный клинический эффект в результате назначения элиминационной диеты с учетом причинно-значимых и перекрестно-реагирующих аллергенов. С учетом поллиноза пациенту планируется проведение аллерген-специфической иммунотерапии пылью березы.

Заключение

Представленный клинический случай демонстрирует эффективность элиминационной диеты у пациента с акне и сопутствующей пищевой и пыльцевой сенсibilизацией.

Назначение индивидуальной элиминационной диеты с учетом аллергологического обследования у пациентов с акне и сопутствующей пыльцевой аллергией в случае резистентности к проводимой стандартной терапии может способствовать уменьшению клинических проявлений заболевания. Данное наблюдение указывает на необходимость привлечения внимания специалистов к проблеме коморбидности аллергии и акне.

Представленный случай демонстрирует необходимость проведения специфического аллергологического обследования пациентам с акне и сопутствующей сенсibilизацией к пыльцевым аллергенам в случае резистентности к проводимой стандартной терапии с целью

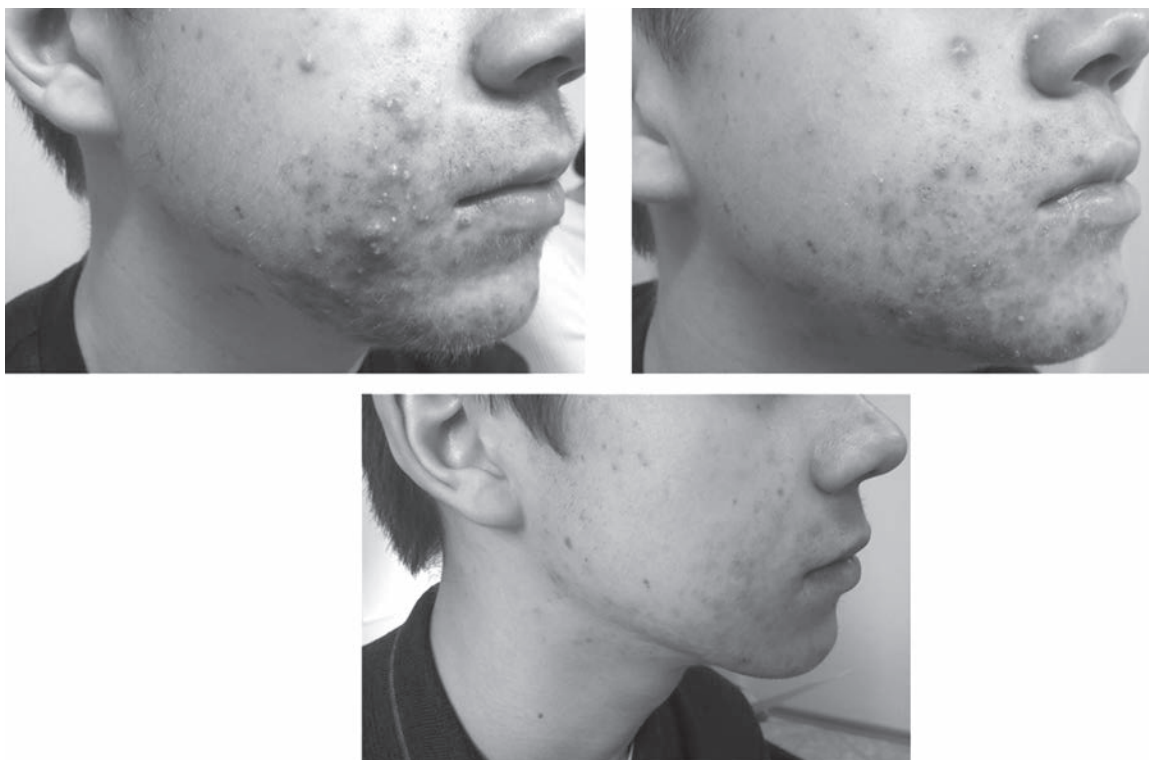


Рис. 1. Динамика регресса высыпаний на правой стороне лица пациента П.: до начала элиминационной диеты (слева сверху), через 6 нед (справа сверху) и 3 мес лечения (снизу)

Fig. 1. Regression of the acne on the right side of patient P.'s face over time: before the start of the elimination diet (top left), after 6 weeks (top right), and 3 months of treatment (bottom)

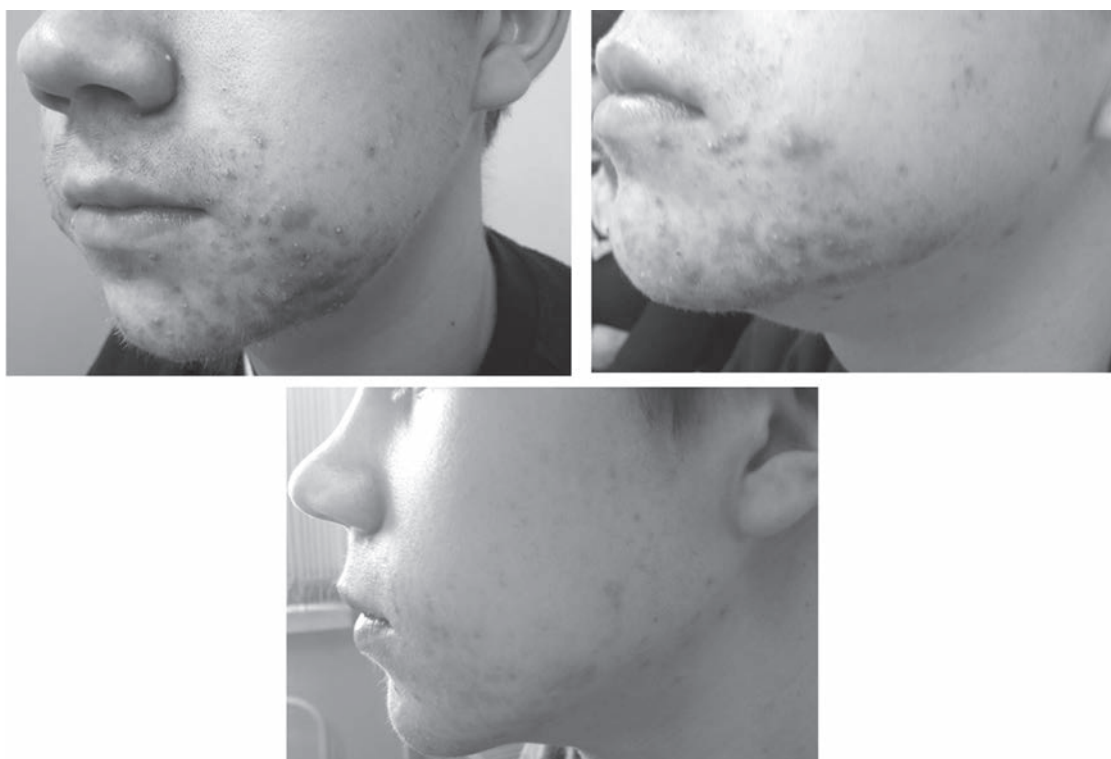


Рис. 2. Динамика регресса высыпаний на левой стороне лица пациента П.: до начала элиминационной диеты (слева сверху), через 6 нед (справа сверху) и 3 мес лечения (снизу)

Fig. 2. Regression of the acne on the left side of patient P.'s face over time: before the start of the elimination diet (top left), after 6 weeks (top right), and 3 months of treatment (bottom)

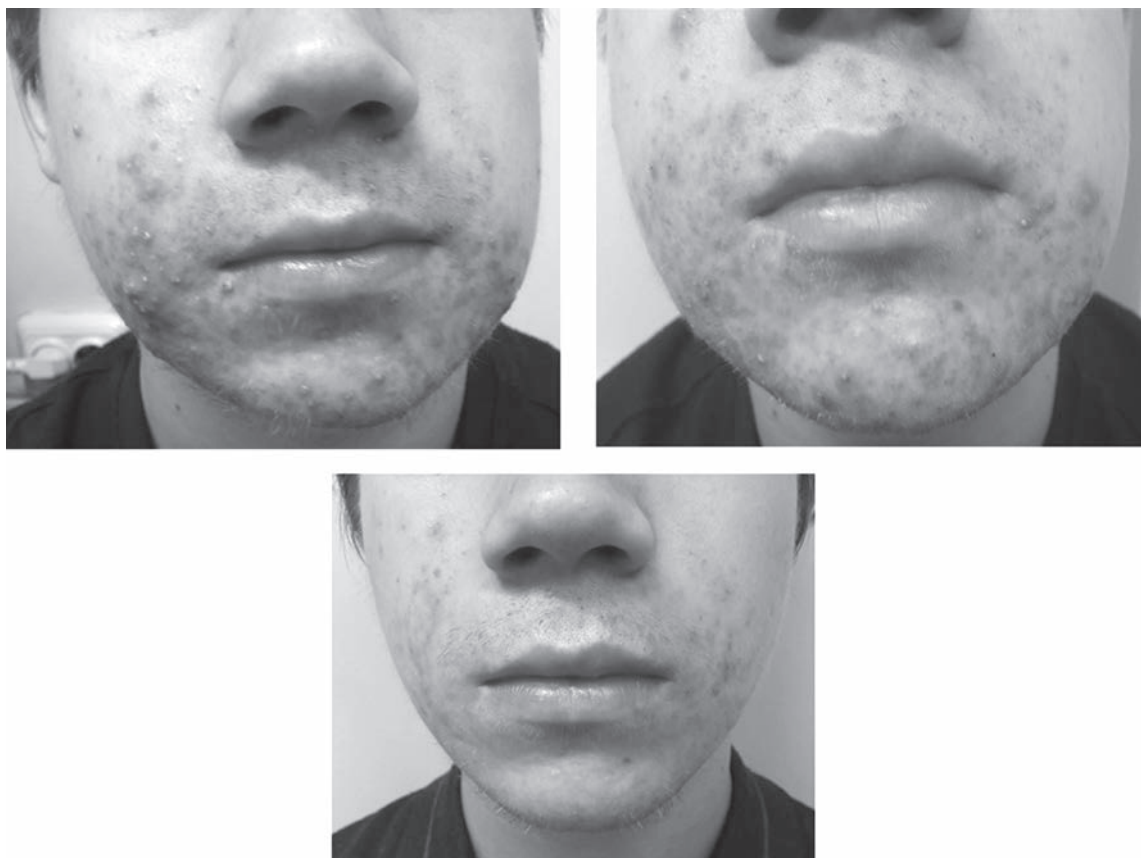


Рис. 3. Динамика регресса высыпаний на коже лица (фас) пациента П.: до начала элиминационной диеты (слева сверху), через 6 нед (справа сверху) и 3 мес лечения (снизу)

Fig. 3. Regression of the acne on the patient P's face (front) over time: before the start of the elimination diet (top left), after 6 weeks (top right), and 3 months of treatment (bottom)

подбора персонализированной элиминационной диеты с исключением причинно-значимых и перекрестно-реагирующих аллергенов.

Актуальность изучаемой проблемы диктует необходимость проведения дальнейших исследований, направленных на комплексный анализ влияния пищевых

и пыльцевых аллергенов на развитие и течение повреждения кожи у пациентов с акне с целью назначения персонализированной диетотерапии. Эти данные помогут разработать новые стратегии профилактики и лечения (дополнительно к стандартной терапии) пациентов с акне.

Сведения об авторах

Барило Анна Александровна (Anna A. Barilo) – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник лаборатории клинической патофизиологии Научно-исследовательского института медицинских проблем Севера – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (Красноярск, Российская Федерация)

E-mail: anntomsk@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5349-9122>

Смирнова Светлана Витальевна (Svetlana V. Smirnova) – доктор медицинских наук, профессор, руководитель научного направления Научно-исследовательского института медицинских проблем Севера – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (Красноярск, Российская Федерация)

E-mail: svetvita@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1197-1481>

Литература

1. Deng Y., Wang F., He L. Skin barrier dysfunction in acne vulgaris: pathogenesis and therapeutic approaches // Med. Sci. Monit. 2024. Vol. 30 Article ID e945336. DOI: <https://doi.org/10.12659/MSM.945336>
2. Molla A., Alrizqi H., Alharbi E., Alsubhi A., Alrizqi S., Shahada O. Assessment of anxiety and depression in patients with acne vulgaris in medina: a case-control study // Clin. Cosmet. Investig. Dermatol. 2021. Vol. 14. P. 999–1007. DOI: <https://doi.org/10.2147/CCID.S302311>

3. Guertler A., Volsky A., Eijkenboom Q., Fiedler T., French L.E., Reinholz M. Dietary patterns in acne and rosacea patients – a controlled study and comprehensive analysis // *Nutrients*. 2023. Vol. 15, N 20. P. 4405. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu15204405>
4. Dreno B., Amici J.M., Demessant-Flavigny A.L., Wright C., Taieb C., Desai S.R. et al. The impact of acne, atopic dermatitis, skin toxicities and scars on quality of life and the importance of a holistic treatment approach // *Clin. Cosmet. Investig. Dermatol.* 2021. Vol. 14. P. 623–632. DOI: <https://doi.org/10.2147/CCID.S315846>
5. Gurtler A., Laurenz S. The impact of clinical nutrition on inflammatory skin diseases // *J. Dtsch. Dermatol. Ges.* 2022. Vol. 20, N 2. P. 185–202. DOI: <https://doi.org/10.1111/ddg.14683>
6. Baldwin H., Tan J. Effects of diet on acne and its response to treatment // *Am. J. Clin. Dermatol.* 2021. Vol. 22, N 1. P. 55–65. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40257-020-00542-y>
7. Барило А.А., Смирнова С.В. Пищевая аллергия как фактор риска развития акне // *Вопросы питания*. 2022. Т. 91, № 6. С. 68–75. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-6-68-75>
8. Borrego-Ruiz A., Borrego J.J. Nutritional and microbial strategies for treating acne, alopecia, and atopic dermatitis // *Nutrients*. 2024. Vol. 16, N 20. P. 3559. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu16203559>
9. Mahmud M.R., Akter S., Tamanna S.K., Mazumder L., Esti I.Z., Banerjee S. et al. Impact of gut microbiome on skin health: gut-skin axis observed through the lenses of therapeutics and skin diseases // *Gut Microbes*. 2022. Vol. 14, N 1. Article ID 2096995. DOI: <https://doi.org/10.1080/19490976.2022.2096995>
10. Ryguła I., Pikiewicz W., Kaminiów K. Impact of diet and nutrition in patients with acne vulgaris // *Nutrients*. 2024. Vol. 16, N 10. P. 1476. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu16101476>

References

1. Deng Y., Wang F., He L. Skin barrier dysfunction in acne vulgaris: pathogenesis and therapeutic approaches. *Med Sci Monit*. 2024; 30: e945336. DOI: <https://doi.org/10.12659/MSM.945336>
2. Molla A., Alrizqi H., Alharbi E., Alsubhi A., Alrizqi S., Shahada O. Assessment of anxiety and depression in patients with acne vulgaris in medina: a case-control study. *Clin Cosmet Investig Dermatol*. 2021; 14: 999–1007. DOI: <https://doi.org/10.2147/CCID.S302311>
3. Guertler A., Volsky A., Eijkenboom Q., Fiedler T., French L.E., Reinholz M. Dietary patterns in acne and rosacea patients – a controlled study and comprehensive analysis. *Nutrients*. 2023; 15 (20): 4405. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu15204405>
4. Dreno B., Amici J.M., Demessant-Flavigny A.L., Wright C., Taieb C., Desai S.R., et al. The impact of acne, atopic dermatitis, skin toxicities and scars on quality of life and the importance of a holistic treatment approach. *Clin Cosmet Investig Dermatol*. 2021; 14: 623–32. DOI: <https://doi.org/10.2147/CCID.S315846>
5. Gurtler A., Laurenz S. The impact of clinical nutrition on inflammatory skin diseases. *J Dtsch Dermatol Ges*. 2022; 20 (2): 185–202. DOI: <https://doi.org/10.1111/ddg.14683>
6. Baldwin H., Tan J. Effects of diet on acne and its response to treatment. *Am J Clin Dermatol*. 2021; 22 (1): 55–65. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40257-020-00542-y>
7. Barilo A.A., Smirnova S.V. Food allergy as a risk factor for acne. *Voprosy pitaniia* [Problems of Nutrition]. 2022; 91 (6): 68–75. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-6-68-75> (in Russian)
8. Borrego-Ruiz A., Borrego J.J. Nutritional and microbial strategies for treating acne, alopecia, and atopic dermatitis. *Nutrients*. 2024; 16 (20): 3559. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu16203559>
9. Mahmud M.R., Akter S., Tamanna S.K., Mazumder L., Esti I.Z., Banerjee S. et al. Impact of gut microbiome on skin health: gut-skin axis observed through the lenses of therapeutics and skin diseases. *Gut Microbes*. 2022; 14 (1): 2096995. DOI: <https://doi.org/10.1080/19490976.2022.2096995>
10. Ryguła I., Pikiewicz W., Kaminiów K. Impact of diet and nutrition in patients with acne vulgaris. *Nutrients*. 2024; 16 (10): 1476. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu16101476>

Для корреспонденции

Симоненко Елена Сергеевна – научный сотрудник
лаборатории технологий продуктов питания детей
дошкольного и школьного возраста НИИ детского питания –
филиала ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»
Адрес: 143500, Российская Федерация, Московская область,
г. Истра, ул. Московская, д. 48
Телефон: (498) 313-03-96
E-mail: nir@niidp.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2878-8069>

Симоненко Е.С.¹, Симоненко С.В.¹, Зорин С.Н.², Короткова Т.Н.², Тармаева И.Ю.²

Комплексное исследование белков кобыльего и коровьего молока и их гидролизатов у детей с аллергией к белкам коровьего молока

Comprehensive study
of mare's and cow's milk
proteins and their hydrolysates
in children with allergy to cow's
milk proteins

Simonenko E.S.¹, Simonenko S.V.¹,
Zorin S.N.², Korotkova T.N.²,
Tarmaeva I.Yu.²

¹ Научно-исследовательский институт детского питания – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, 143500, г. Истра, Московская область, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, 109240, г. Москва, Российская Федерация

¹ Research Institute of Child's Nutrition – branch of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, 143500, Istra, Moscow Region, Russian Federation

² Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, 109240, Moscow, Russian Federation

Применение инновационных белковых ингредиентов, полученных биотехнологическими методами, требует всестороннего исследования их аллергенного потенциала для детского организма.

Цель исследования – оценка клинической значимости и профиля безопасности гидролизатов белков коровьего и кобыльего молока, а также лактоферрина (ЛФ) для детей с аллергией к белкам коровьего молока (БКМ) на основе изучения способности данных продуктов связывать специфические IgE, что позволяет

Финансирование. Исследование выполнено за счет средств субсидии на выполнение государственного задания (FGMF-2025-0007).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Вклад авторов. Концепция и дизайн исследования – Симоненко С.В.; сбор и обработка данных – Симоненко Е.С., Зорин С.Н.; статистическая обработка данных – Тармаева И.Ю.; написание статьи – Симоненко Е.С., Короткова Т.Н.; редактирование, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи – все авторы.

Для цитирования: Симоненко Е.С., Симоненко С.В., Зорин С.Н., Короткова Т.Н., Тармаева И.Ю. Комплексное исследование белков кобыльего и коровьего молока и их гидролизатов у детей с аллергией к белкам коровьего молока // Вопросы питания. 2025. Т. 94, № 6. С. 97–105. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-97-105>

Статья поступила в редакцию 18.08.2025. **Принята в печать** 17.11.2025.

Funding. The study was carried out at the expense of a subsidy for the implementation of the state task (FGMF-2025-0007).

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

Contribution. The concept and design of the study – Simonenko S.V.; data collection and processing – Simonenko E.S., Zorin S.N.; statistical data processing – Tarmaeva I.Yu.; writing of the article – Simonenko E.S., Korotkova T.N.; editing, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article – all authors.

For citation: Simonenko E.S., Simonenko S.V., Zorin S.N., Korotkova T.N., Tarmaeva I.Yu. Comprehensive study of mare's and cow's milk proteins and their hydrolysates in children with allergy to cow's milk proteins. Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]. 2025; 94 (6): 97–105. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-97-105> (in Russian)

Received 18.08.2025. **Accepted** 17.11.2025.

оценить риски их применения, включая потенциальную перекрестную реактивность с белками кобыльего молока (БКобМ) и первичную аллергенность.

Материал и методы. В работе использованы ЛФ из молозива коров, а также гидролизаты БКМ и БКобМ, полученные ферментоллизом с использованием трипсина или протозима из концентрата сывороточных белков коровьего молока и обезжиренного кобыльего молока с последующей очисткой гидролизатов методом тангенциальной ультрафильтрации через мембрану на основе полиэфирсульфона с размерами пор 10 кДа со сбором низкомолекулярной фракции с ее последующим обессоливанием нанофильтрацией и лиофилизацией. Оценку перекрестной реактивности между белковыми фракциями молока разных видов *in vitro* выполняли методом непрямого иммуноферментного анализа (ИФА). Количественное определение специфических IgE к пептидным компонентам изучаемых гидролизатов, а также к ЛФ и бычьему сывороточному альбумину (БСА) проводили с применением твердофазного ИФА. Для выявления антител к нативным БКМ использовали коммерческую тест-систему «АллергоИФА-специфические IgE». В работе использовали сыворотку крови 52 детей в возрасте 1–6 лет (25 мальчиков и 27 девочек) со среднетяжелыми и тяжелыми формами аллергических заболеваний (атопический дерматит, бронхиальная астма, пищевая аллергия) с установленной пищевой аллергией к БКМ.

Результаты. Проведенное исследование показало, что перекрестные реакции между БКМ и БКобМ, а также их ферментативными гидролизатами выражены незначительно. Коэффициент снижения антигенности гидролизатов БКобМ относительно сывороточных БКМ варьировал от 26 700 до 39 200, а относительно казеиновых фракций БКМ – от 11 000 до 13 800. Иммунохимический анализ сывороток пациентов с подтвержденной сенсibilизацией к БКМ выявил принципиальные различия в IgE-реактивности к изучаемым антигенам. Значимые титры специфических IgE к гидролизованному БКобМ практически отсутствовали. Сенсibilизация к гидролизатам БКМ регистрировалась у небольшой, но статистически значимой доли пациентов ($\leq 10\%$), демонстрируя достоверно более высокие средние уровни антител ($p < 0,05$). ЛФ занимал промежуточное положение: его способность индуцировать синтез IgE была сопоставима с гидролизатом БКМ, но при этом статистически значимо превосходила низкоаллергенный белок-маркер – БСА. Критически важным результатом является подтверждение того, что все 4 исследуемых антигена (гидролизат БКобМ, гидролизат БКМ, ЛФ, БСА) демонстрировали многократно и достоверно ($p < 0,001$) более низкие показатели как по среднему уровню специфических IgE, так и по частоте их детекции в диагностическом титре в сравнении с БКМ. Комплексный анализ профиля сенсibilизации направлен на установление степени безопасности и определения возможных ограничений в использовании этих продуктов у сенсibilизированных пациентов.

Заключение. Результаты исследования позволяют рассматривать гидролизаты БКобМ как перспективный белковый компонент для создания гипоаллергенных смесей, предназначенных для детей первого года жизни с легкой степенью сенсibilизации к БКМ или наследственной предрасположенностью к ней.

Ключевые слова: пищевая аллергия; гидролизат; кобылье молоко; коровье молоко; лактоферрин; IgE-антитела

The use of innovative protein ingredients produced by biotechnological methods requires a comprehensive assessment of their allergenic potential for the child's body.

The aim of the study was to evaluate the clinical significance and safety profile of hydrolysates of cow's and mare's milk proteins and lactoferrin (LF) for children with cow's milk protein (CMP) allergy. This was based on the investigation of the ability of these products to bind specific IgE, allowing for an assessment of the risks associated with their use, including potential cross-reactivity with mare's milk proteins (MMP) and primary allergenicity.

Material and methods. LF from bovine colostrum, as well as hydrolysates of CMP and MMP have been used in the study. Protein hydrolysates from a concentrate of whey proteins of cow's milk and skim mare's milk were obtained by enzymolysis using two enzymes: trypsin and protozyme. Unreacted protein and enzyme were removed from the hydrolysates by tangential ultrafiltration through a 10 kDa polyethersulfone membrane, collecting the low-molecular-weight fraction, and subsequent desalination by nanofiltration. The purified and concentrated product was lyophilized using a freeze dryer. Cross-reactivity between protein fractions from different milks was assessed using indirect ELISA. Specific IgE responses to the peptide components of the studied hydrolysates, as well as to LF and bovine serum albumin (BSA), were quantified using enzyme-linked immunosorbent assay. To detect antibodies to native CMP, the commercial AllergoELISA-specific IgE test system was used. Blood serum of 52 children aged 1–6 years (25 boys and 27 girls) with moderate and severe forms of allergic diseases (atopic dermatitis, bronchial asthma, food allergies) with established food allergy to BCM has been used in the research.

Results. The study results showed that cross-reactions between CMP and MMP, and their enzymatic hydrolysates, are expressed insignificantly. The antigenicity reduction coefficient of MMP hydrolysates relative to whey CMP varied from 26.700 to 39.200, and relative to casein fractions of CMP – from 11.000 to 13.800. An immunochemical analysis of blood serum from patients with confirmed sensitization to CMP revealed fundamental differences in IgE reactivity to the studied antigens. A key observation was the virtual absence of significant specific IgE titers to the hydrolyzed MMP. In contrast, sensitization to hydrolyzed CMP was detected in a small but statistically significant proportion of patients ($\leq 10\%$), demonstrating significantly higher mean antibody levels ($p < 0,05$). LF occupied an intermediate position: its ability to induce IgE synthesis was comparable to CMP hydrolysates but statistically significantly exceeded that of the low-allergenic marker protein, bovine serum albumin (BSA). A critically important result is the confirmation that all four studied antigens (MMP hydrolysate, CMP hydrolysate, LF, BSA) demonstrated repeatedly and reliably ($p < 0.001$) lower values both for the average level of specific IgE and for the frequency of their detection in the diagnostic titer, in comparison with CMP. The comprehensive analysis of the sensitization profile is aimed at establishing the safety degree and determining potential limitations for the use of these products in sensitized patients.

Conclusion. The results of the research indicate that MMP hydrolysates are a promising protein component for creating hypoallergenic formulas intended for infants who have a mild degree of sensitization to CMP or a hereditary predisposition to it.

Keywords: food allergy; hydrolysate; mare's milk; cow's milk; lactoferrin; IgE antibodies

Рост распространенности пищевой аллергии и непереносимости белков у детского населения, а также увеличение частоты гастроинтестинальных нарушений обуславливают необходимость создания специализированных пищевых продуктов [1]. Согласно современным представлениям IgE-опосредованная пищевая аллергия, являющаяся наиболее распространенной формой в западных странах и особенно среди детей в возрасте до 3 лет, представляет собой глобальную проблему здравоохранения [2]. Аллергия на белки коровьего молока (БКМ), входящего в ограниченную группу основных аллергенов (арахис, орехи, моллюски, рыба, яйца, соя, пшеница), является доминирующей и повсеместно распространенной формой пищевой аллергии, особенно среди пациентов детского возраста [3]. Таким образом, создание специализированных пищевых продуктов требует включения гипоаллергенных протеиновых компонентов, сочетающих оптимальную биологическую доступность и удовлетворительные органолептические характеристики. Наибольшие перспективы связаны с применением ферментативных гидролизатов пищевых белков, где возможно точное регулирование глубины расщепления. Современные биотехнологические методы, включая мембранную ультра- и нанофильтрацию, обеспечивают щадящее воздействие на пептидный профиль гидролизатов, что способствует значительному улучшению их иммунохимических и вкусовых характеристик [1, 4].

Протеиновая основа большинства специализированных пищевых продуктов для диетического (лечебного и профилактического) питания представлена ферментативными гидролизатами, полученными из цельного коровьего молока и различных его фракций – казеиновой и сывороточной. Особое значение имеет степень снижения антигенности: для гидролизатов, предназначенных для гипоаллергенных продуктов, обязательным является достижение коэффициента снижения антигенности (КСА) на уровне не менее $1,0 \times 10^5$ по сравнению с исходным белковым субстратом [5]. К числу технологических недостатков рассматриваемых гидролизатов относятся 2 ключевых параметра: горький вкус и высокая осмоляльность, что отрицательно влияет на органолептику конечных продуктов. Кроме того, нужного снижения аллергенности можно достичь только с помощью мембран с очень мелкими порами (до 10 кДа), из-за чего процесс обработки становится сложным и трудоемким [1].

Создание гипоаллергенных смесей для лечебного питания с требуемыми значениями КСА невозможно без использования высокоактивных ферментных препаратов, промышленное производство которых в России в настоящий момент отсутствует. К числу таких импортируемых протеаз относятся Alcalase, Neutrase и Flavourzyme (Novozymes, Дания) [6–8]. В отличие от коровьего молока, белковые компоненты кобыльего молока характеризуются существенно меньшей аллергенной активностью [9]. Согласно клиническим исследованиям, у 96% детей с подтвержденной аллергией

к БКМ не выявляется реакций непереносимости на продукты из кобыльего молока. Более того, кобылье молоко демонстрирует иммуномодулирующие свойства – его введение снижает уровни сывороточного IgE и увеличивает популяцию регуляторных Т-клеток у сенсибилизированных животных [5].

Высокая усвояемость и пищевая ценность кобыльего молока обусловлены его уникальным составом [10]. По содержанию белка и соотношению казеинов и сывороточных белков (~60:40) оно значительно ближе к человеческому молоку, чем коровье (~80:20). Белковый компонент характеризуется высоким содержанием сывороточных фракций – β -лактоглобулина (3,3 г/кг), α -лактальбумина (2,4 г/кг), а также значительными концентрациями иммуноглобулинов (1,5 г/кг), лактоферрина (ЛФ, 0,9 г/кг) и лизоцима (0,7 г/кг) [11]. Среди казеинов преобладает β -казеин (11,0 г/кг), тогда как содержание α s1-казеина составляет 2,5 г/кг, а α s2- и κ -казеинов – менее 0,2 г/кг [12]. В коровьем молоке самое большое количество казеинов, поэтому его называют молоком казеинового типа, тогда как кобылье и человеческое молоко называются молоком альбуминового типа. Высокая концентрация казеинов в коровьем молоке объясняет его аллергенность для младенцев, тогда как преобладание альбуминов в кобыльем молоке определяет его гипоаллергенные свойства [13].

Согласно данным исследования, проведенного с участием 25 пациентов с аллергией к БКМ, кобылье молоко демонстрирует свойства гипоаллергенного продукта у лиц с сенсибилизацией к казеину, α -лактальбумину, β -лактоглобулину и бычьему сывороточному альбумину (БСА) [14]. Авторы отмечают его позитивное влияние как на клинические проявления аллергии, так и на иммунологические показатели.

Кроме того, кобылье молоко обладает высокой пищевой ценностью и полезно для питания пожилых людей, выздоравливающих больных и новорожденных. Низкое содержание белка, близкое к человеческому молоку [15], сочетается с высоким уровнем биологически активных компонентов – лизоцима, обладающего противовоспалительным, противовирусным и иммуностимулирующим действием, и ЛФ, демонстрирующего антимикробную активность [16].

Кобылье молоко характеризуется благоприятным липидным профилем – оно чрезвычайно богато полиненасыщенными жирными кислотами (~53% от общего состава жирных кислот), имеет низкое содержание холестерина и включает в свой состав незаменимые линолевую и α -линоленовую кислоты. Важным преимуществом является высокое содержание лактозы, представленной преимущественно в форме β -лактозы, которая обладает пребиотическими свойствами и способствует росту полезной кишечной микрофлоры [16, 17].

Витаминный комплекс кобыльего молока включает витамины А, группы В, С, D, Е, К, а также β -каротин; минеральный состав представлен кальцием, натрием, калием, фосфором, железом, магнием, медью, йодом, серой, кобальтом, цинком и бромом [13, 18]. Благодаря

оптимальному соотношению белка и неорганических веществ нагрузка на почки от кобыльего молока сравнима с нагрузкой от грудного молока, что подтверждает его пригодность для детского питания [19].

В традиционной медицине в России и азиатских странах издавна применяются кобылье молоко и кумыс в терапии широкого спектра заболеваний, включая хронический гепатит, язвенную болезнь, туберкулез, бронхит, астму, анемию, нефрит, диарею и гастрит [20]. Как свидетельствуют данные I.M.L Barreto и соавт., кобылье молоко демонстрирует высокую переносимость у детей с пищевой аллергией, эффективность при лечении атопического дерматита и хронических заболеваний желудочно-кишечного тракта, а также может использоваться для нутритивной поддержки пациентов с несколькими заболеваниями одновременно [21].

В нашей предыдущей работе [5] были проведены исследования процесса гидролиза и последующей мембранной обработки белков кобыльего молока (БКоБМ), определены пептидный профиль этих гидролизатов с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии, а также остаточная антигенность в составе гидролизатов БКоБМ (ГБКоБМ) и КСА относительно исходного БКоБМ. В результате проведенного исследования экспериментально обоснована эффективность ферментных препаратов отечественного производства трипсин и протозим. КСА для ГБКоБМ, полученных с использованием трипсина, составили 1400–1600, с применением протозима – 1900–2000 [5]. Для гидролизатов БКМ (ГБКМ) достигнутые КСА недостаточны для использования в питании детей с соответствующей аллергией. В связи с этим, учитывая низкую аллергенность кобыльего молока, представляют интерес оценки перекрестных реакций между БКМ и БКоБМ и перспектив замены в составе гипоаллергенных продуктов для лечебного питания ГБКМ на ГБКоБМ.

Внедрение инновационных белковых ингредиентов (ГБКоБМ, ГБКМ, а также ЛФ) в детское питание требует строгой оценки их безопасности, особенно в отношении аллергенных свойств. Предыдущие исследования на модели анафилактического шока у крыс [22] показали, что эти компоненты не усиливают аллергизацию к гетерологичным белкам, однако остается неясным степень их перекрестной реактивности с основными аллергенами коровьего молока [БКМ, его казеиновыми (КМБ) и сывороточными фракциями (КСБ)], что критично для детей с уже диагностированной аллергией к БКМ, а также собственный аллергенный потенциал ГБКоБМ, ГБКМ и ЛФ, который может проявляться даже при отсутствии перекрестной реактивности.

Цель исследования – оценка клинической значимости и профиля безопасности ГБКМ и ГБКоБМ, а также ЛФ для детей с аллергией к БКМ на основе изучения способности данных продуктов связывать специфические IgE, что позволяет оценить риски их применения, включая потенциальную перекрестную реактивность с БКоБМ и первичную аллергенность.

В работе использованы ЛФ из молозива коров (ООО «Победа-1», РФ), а также ГБКМ и ГБКоБМ, полученные, соответственно, из концентрата сывороточных БКМ с содержанием белка 80,2% (ПАО «Молочный комбинат «Воронежский», РФ) и обезжиренного кобыльего молока с содержанием белка 22,1% (ООО «Снайп», РФ) ферментализом с использованием 2 ферментов: трипсина (ООО «Биопрогресс», РФ) и протозима (ТД «БИО-ПРЕПАРАТ», Россия), очищенные от не прореагировавшего белка и фермента методом тангенциальной ультрафильтрации через мембрану на основе полиэфирсульфона с размерами пор 10 кДа со сбором низкомолекулярной фракции с ее последующими обессоливанием нанофильтрацией и лиофилизацией [5, 22].

Перекрестную антигенность БКоБМ и БКМ определяли *in vitro* непрямым иммуноферментным методом [22] с некоторыми модификациями, используя в качестве стандарта и для сенсibilизации 96-луночный плоскодонный планшет КСБ «Мультилак S14» и КМБ (Arla, Дания), а в качестве анализируемых образцов исследовали исходное обезжиренное кобылье молоко, выступавшее в роли нативного препарата его белков (БКоБМ), а также образцы полученных на его основе ферментативных гидролизатов (ГБКоБМ). При проведении реакций иммуноферментного определения использовали гипериммунную моноспецифическую кроличью антисыворотку против КСБ (ИП Шанин, РФ), гипериммунную моноспецифическую антисыворотку человека против КМБ (получена в Консультативно-диагностическом центре «Детское питание», ФГАУ «ННПЦЗД» Минздрава РФ) и антивидовые конъюгаты с пероксидазой против IgG (L+N) кролика и человека (Филиал «Медгамал» НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, РФ). В качестве нагрузочного белка в фосфатно-солевом буфере использовали гидролизат коллагена курицы (ООО «Софос Протеин Биотехнологджи», РФ) с содержанием белка 0,1%.

Для определения уровня специфических IgE использовали сыворотку крови 52 детей в возрасте 1–6 лет (25 мальчиков и 27 девочек) со среднетяжелыми и тяжелыми формами аллергических заболеваний (атопический дерматит, бронхиальная астма, пищевая аллергия) с установленной пищевой аллергией к БКМ, полученную из собранной в утреннее время после не менее чем 6-часового голодания периферической венозной крови в ходе планового диагностического обследования вне периода обострения.

Для подтверждения диагноза использовали данные пищевых дневников и результаты определения специфических IgE к нативным БКМ в сыворотке крови. Из исследования исключали пациентов, получавших иммунобиологическую терапию, лечение глюкокортикостероидами или антигистаминными средствами, а также детей с острыми инфекционно-воспалительными заболеваниями. В соответствии с нормами Хельсинкской декларации от всех законных представителей несовершеннолетних участников было получено письменное информированное согласие на применение биоматериала в научных целях (протокол Этического комитета № 4

от 21.03.2023). После центрифугирования образцов при 660 g в течение 15 мин полученную сыворотку замораживали и хранили при -20 °С до проведения дальнейших аналитических исследований.

Содержание аллерген-специфических IgE-антител к исследуемым антигенам (ГБКМ, ГБКоБМ, ЛФ и БСА) определяли методом твердофазного иммуноферментного анализа (ИФА). Полистироловые планшеты сенсibilizировали растворами антигенов (10 мкг/мл в 0,1 М Na-бикарбонатном буфере, pH 9,6) в течение 16 ч при 2–4 °С. После отмывки фосфатно-солевым буфером pH 7,4 с 0,1% твин-20 лунки блокировали 1% раствором желатина в фосфатно-солевом буфере и хранили при -20 °С до использования. В день проведения анализа планшеты и образцы сывороток размораживали при комнатной температуре. Сыворотки инкубировали в сенсibilizированных лунках в течение 3 ч при 37 °С. После отмывки вносили конъюгат антител к IgE с пероксидазой, инкубировали 1 ч и манифестировали субстратом тетраметилбензидин. Реакцию останавливали добавлением 0,1 М HCl через 25 мин. Экстинкцию измеряли при 450 нм (референс-фильтр 620 нм) на фотометре Multiskan FC (Thermo Fisher Scientific, Финляндия). Количественное содержание IgE определяли по калибровочной кривой с использованием стандартизированных образцов [23].

Для количественного определения специфических иммуноглобулинов Е к БКМ использовали коммерческую тест-систему «АллергоИФА-специфические IgE» («Алкор Био», РФ).

Статистический анализ полученных результатов проводили с привлечением непараметрических методов. Сравнение парных показателей концентрации антител осуществляли с помощью критерия Вилкоксона, а для оценки различий в частотах встречаемости признаков использовали критерий χ^2 . Статистически достоверными считали различия при достижении уровня значимости $p < 0,05$.

Результаты

Для определения перекрестной антигенности БКоБМ и БКМ (казеиновых и сывороточных фракций) в предварительных экспериментах для построения калибровочной кривой было подобрано оптимальное разведение антисывороток. Они составили для антисыворотки против КСБ 1/40 000 и для антисыворотки против концентрата казеиновых БКМ 1/500. Эти специфические антисыворотки использовали в качестве инструмента для детекции и количественной оценки белков, схожих с аллергенами коровьего молока, в образцах кобыльего молока и его гидролизатов.

На рис. 1 приведена калибровочная кривая, по которой рассчитывали процент перекрестной антигенности КСБ и БКоБМ и их гидролизатов.

При этом процент связывания, приведенный по оси абсцисс (см. рис. 1), рассчитывают по формуле:

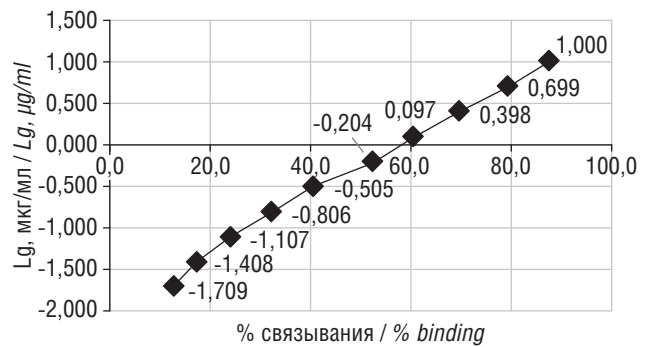


Рис. 1. Калибровочная кривая для определения перекрестной антигенности концентрата сывороточного белка и белков кобыльего молока

Fig. 1. Calibration curve for determining the cross-antigenicity of whey protein concentrate and mare's milk proteins

$$J(n) (\%) = \frac{100 \times (B_0(n) - B_n)}{B_0(n)},$$

где $B_0(n)$ – среднее значение (из 2 параллельных измерений) оптической плотности для нулевого связывания; B_n – среднее значение (из 2 параллельных измерений) оптической плотности для каждого разведения стандартного раствора КСБ; по оси ординат – десятичный логарифм концентрации КСБ (мкг/мл).

По данной калибровочной кривой рассчитывали КСА БКоБМ и ГБКоБМ относительно КСБ по формуле:

$$КСА = \frac{C_{П\ 50\%}}{C_{БКоБМ\ 50\%}},$$

где $C_{П\ 50\%}$ – концентрация раствора исследуемого образца, соответствующая 50% связыванию конъюгата, мкг/мл; $C_{БКоБМ\ 50\%}$ – концентрация стандартного раствора КСБ, соответствующая 50% связыванию конъюгата, мкг/мл.

На рис. 2 приведена аналогичная калибровочная кривая, по которой определяли процент перекрестной антигенности КМБ с БКоБМ и ГБКоБМ.

В табл. 1 приведены результаты определения перекрестных реакций антигенов БКМ (сывороточных и казеиновых фракций) и БКоБМ в исходном субстрате и его ферментативных гидролизатах (в единицах КСА и весовых процентах содержания антигенных структур КСБ и КМБ, дающих перекрестные реакции с БКоБМ и его гидролизатами).

Результаты исследования показали, что перекрестные реакции между БКМ и БКоБМ, а также их ферментативными гидролизатами, выражены незначительно. Относительно сывороточных белков КСА варьирует от 26 700 до 39 200, а относительно КМБ – от 11 000 до 13 800.

Определение уровня специфических IgE к ГБКоБМ является важным этапом доклинических исследований, позволяющим оценить их потенциальную аллергенность и безопасность для использования в специализирован-

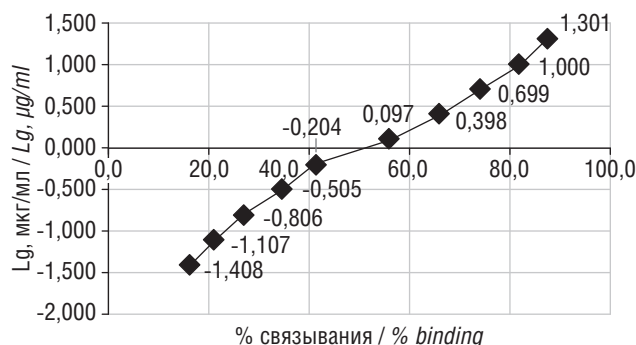


Рис. 2. Калибровочная кривая для определения перекрестной антигенности концентрата белков коровьего молока и белков кобыльего молока

Fig. 2. Calibration curve for determining the cross-antigenicity of cow's milk protein concentrate and mare's milk proteins

ных пищевых продуктах для диетического (лечебного и профилактического) питания, особенно у пациентов с сенсибилизацией к БКМ.

Иммунохимический анализ сывороток пациентов с подтвержденной сенсибилизацией к БКМ выявил принципиальные различия в IgE-реактивности к изучаемым

мым антигенам (табл. 2) [23]. Ключевым наблюдением стало практическое отсутствие значимых титров специфических IgE к гидролизованному БКоБМ, концентрация которых находилась на уровне фоновых показателей ИФА. В отличие от этого, сенсибилизация к ГБКМ регистрировалась у небольшой, но статистически значимой доли пациентов (<10%), демонстрируя достоверно более высокие средние уровни антител ($p < 0,05$). ЛФ занимал промежуточное положение: его способность индуцировать синтез IgE была сопоставима с ГБКМ, но при этом статистически значимо превосходила низкоаллергенный белок-маркер БСА. Критически важным результатом является подтверждение того, что все 4 исследуемых антигена (ГБКоБМ, ГБКМ, ЛФ, БСА) демонстрировали многократно и достоверно ($p < 0,001$) более низкие показатели как по среднему уровню специфических IgE, так и по частоте их детекции в диагностическом титре в сравнении с БКМ.

Обсуждение

Проведенный анализ выявил существенное снижение иммунореактивности изученных гидролизованных

Таблица 1. Доля перекрестных реакций белков коровьего молока [сывороточных (КСБ) и казеиновых (КМБ) фракций] и белков кобыльего молока (БКоБМ) в исходном субстрате и его гидролизатах

Table 1. Per cent of cross-reactions of cow's milk proteins [milk protein concentrate (MPC) and whey protein concentrate (WPC)] and mare's milk proteins (MMP) in the initial substrate and its hydrolysates

Образец Sample	Антиген / Antigen			
	КСБ / WPC		КМБ / MPC	
	KCA / ARF	%	KCA / ARF	%
БКоБМ / MMP	4300±200	0,0232±0,0011	550±20	0,181±0,008
ГБКоБМ трипсин 2% / MMP hydrolysate (trypsin 2%)	39 200±3100	0,00259±0,00022	11 000±300	0,00910±0,00024
ГБКоБМ протозим 2% / MMP hydrolysate (protozyme 2%)	26 700±2700	0,00383±0,00043	13 800±600	0,00729±0,00032

KCA – кратность снижения антигенности.

ARF – antigenicity reduction factor.

Таблица 2. Концентрация аллерген-специфических IgE-антител к гидролизату белка кобыльего молока (ГБКоБМ), гидролизату белка коровьего молока (ГБКМ), лактоферрину, бычьему сывороточному альбумину (БСА) и белку коровьего молока (БКМ) в сыворотке крови детей с пищевой аллергией к коровьему молоку [23]

Table 2. Concentration of allergen-specific IgE antibodies to mare's milk protein hydrolysate (MMPH), cow's milk protein hydrolysate (CMPH), lactoferrin (LF), bovine serum albumin (BSA) and whole cow's milk protein (CMP) in the blood serum of children with food allergy to cow's milk [23]

№	Антиген / Antigen	Число проб Number of samples	Концентрация аллерген-специфических IgE-антител Concentration of allergen-specific IgE antibodies (M±m)	Количество положительных результатов* Number of positive results*	Доля положительных результатов, % % of positive results
1	ГБКоБМ / MMPH	52	0,017±0,002 ^{2, 3, 4, 5}	0	0 ^{2, 5}
2	ГБКМ / CMPH	52	0,121±0,024 ^{1, 4, 5}	5	9,6 ^{1, 5}
3	Лактоферрин / LF	52	0,092±0,012 ^{1, 4, 5}	2	3,9 ⁵
4	БСА / BSA	52	0,044±0,014 ^{1, 2, 3, 5}	1	1,9 ⁵
5	БКМ / CMP	51	5,17±2,08 ^{1, 2, 3, 4}	48	94,1 ^{1, 2, 3, 4}

Примечание. * – положительными считались пробы с концентрацией аллерген-специфических IgE-антител >0,35 МЕ/мл; надстрочные индексы – номера антигенов, различие с которыми статистически значимо ($p < 0,05$).

Note. * – samples with the level of allergen-specific IgE antibodies >0.35 IU/ml were considered positive; superscripts – numbers of antigens, the difference with which is statistically significant ($p < 0.05$).

белков (ГБКоБМ, ГБКМ) и ЛФ в сравнении с нативными молочными белками. Основную аллергенную нагрузку в цельном молоке несут β -лактоглобулин и α -казеин, именно к ним направлена большая часть специфических IgE-антител у пациентов с сенсibilизацией [24]. Сравнительная оценка выявила принципиальные различия между гидролизатами: тогда как ГБКМ вызывал продукцию специфических IgE у значительной части обследованных, ГБКоБМ характеризовался минимальной аллергенной активностью. При этом сенсibilизирующий потенциал ЛФ, оцененный по среднему титру IgE-антител, статистически значимо превышал аналогичный показатель относительно низкоаллергенного белка БСА.

Создание ГБКМ с КСА 1×10^5 требует применения импортных ферментных препаратов, промышленное производство аналогов которых в Российской Федерации в настоящее время не освоено. Кроме этого, необходимо проводить ультрафильтрационную обработку через мембраны с размерами пор не более 10 кДа, что технологически требует большого времени проведения процесса и высокого давления. Помимо этого, такие гидролизаты характеризуются сильной горечью и для ее снижения требуют дополнительной либо ферментативной, либо физико-химической обработки (использование экзопептидаз, дезамидирование, удаление горьких пептидов дополнительной мембранной фильтрацией).

В отличие от глубоких ГБКМ, ГБКоБМ со средней или невысокой степенью гидролиза, со сниженной горечью, хорошей растворимостью и низкой осмоляльностью являются чрезвычайно перспективным белковым компонентом в составе продуктов для лиц с непереносимостью к коровьему или козьему молоку. Технология получения таких гидролизатов предусматривает использование только отечественных субстрата, ферментов и оборудования.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает целесообразность включения ГБКоБМ в рецептуры гипоаллергенных смесей для младенцев с легкими проявлениями аллергии к БКМ или отягощенным семейным анамнезом по данному заболеванию. ГБКМ может применяться в рационе здоровых детей, включая группы риска (недоношенные, с низкой массой тела), а также при различных нарушениях пищеварения, однако его исключают из состава гипоаллергенных продуктов. Низкий аллергенный потенциал ЛФ делает его перспективной белковой основой для смесей для новорожденных, не сенсibilизированных к БКМ. Все сформулированные рекомендации носят ориентировочный характер и подлежат дальнейшему подтверждению в рамках клинических исследований готовых форм детского питания.

Сведения об авторах

Симоненко Елена Сергеевна (Elena S. Simonenko) – научный сотрудник лаборатории технологий продуктов питания детей дошкольного и школьного возраста НИИ детского питания – филиала ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (Истра, Московская область, Российская Федерация)

E-mail: nir@niidp.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2878-8069>

Симоненко Сергей Владимирович (Sergey V. Simonenko) – доктор технических наук, директор НИИ детского питания – филиала ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (Истра, Московская область, Российская Федерация)

E-mail: dir@niidp.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6999-5048>

Зорин Сергей Николаевич (Sergey N. Zorin) – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории пищевых биотехнологий и специализированных продуктов ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (Москва, Российская Федерация)

E-mail: zorin@ion.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2689-6098>

Короткова Татьяна Николаевна (Tatiana N. Korotkova) – кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией клинической биохимии, аллергологии и иммунологии ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (Москва, Российская Федерация)

E-mail: tntisha@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3684-9992>

Тармаева Инна Юрьевна (Inna Yu. Tarmaeva) – доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории возрастной нутрициологии, ученый секретарь ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (Москва, Российская Федерация)

E-mail: tarmaeva@ion.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7791-1222>

Литература

1. Зорин С.Н. Ферментативные гидролизаты пищевых белков для специализированных пищевых продуктов диетического (лечебного и профилактического) питания // Вопросы питания. 2019. Т. 88, № 3. С. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10026>
2. Cianferoni A., Spergel J.M. Food allergy: review, classification and diagnosis // *Allergol. Int.* 2009. Vol. 58, N 4. P. 457–466. DOI: <https://doi.org/10.2332/allergolint.09-RAI-0138>
3. Elghoudi A., Narchi H. Food allergy in children-the current status and the way forward // *World J. Clin. Pediatr.* 2022. Vol. 11, N 3. P. 253–269. DOI: <https://doi.org/10.5409/wjcp.v11i3.253>
4. Гмошинский И.В., Зилова И.С., Зорин С.Н., Демкина Е.Ю. Мембранные технологии — инновационный метод повышения биологической ценности белка для питания детей раннего возраста // Вопросы современной педиатрии. 2012. Т. 11, № 3. С. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.15690/vsp.v11i3.297>
5. Семенова Е.С., Симоненко Е.С., Симоненко С.В., Зорин С.Н., Мазо В.К. Гидролизаты белков кобыльего молока. Иммунохимическая и физико-химическая характеристика // Пищевые системы. 2024. Т. 7, № 3. С. 466–472. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-466-472>
6. Kiewiet M.B., Gros M., Van Neerven R.J., Faas M.M., De Vos P. Immunomodulating properties of protein hydrolysates for application in cow's milk allergy // *Pediatr. Allergy Immunol.* 2015. Vol. 26, N 3. P. 206–217. DOI: <https://doi.org/10.1111/pai.12354>
7. Liu X., Jiang D., Peterson D.G. Identification of bitter peptides in whey protein hydrolysate // *J. Agric. Food Chem.* 2014. Vol. 62, N 25. P. 5719–5725. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf4019728>
8. Lei F., Zhao Q., Sun-Waterhouse D., Zhao M. Characterization of a salt-tolerant aminopeptidase from marine *Bacillus licheniformis* SWJS33 that improves hydrolysis and debittering efficiency for soy protein isolate // *Food Chem.* 2017. Vol. 214. P. 347–353. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.028>
9. Lajnaf R., Feki S., Ben Ameur S., Attia H., Kammoun T., Ayadi M.A., Masmoudi H. Recent advances in selective allergies to mammalian milk proteins not associated with Cow's Milk Proteins Allergy // *Food Chem. Toxicol.* 2023. Vol. 178. Article ID 113929. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2023.113929>
10. Курченко В.П., Симоненко Е.С., Сушинская Н.В., Головач Т.Н., Петров А.Н., Симоненко С.В. Идентификация кобыльего молока и его смеси с коровьим молоком методом ВЭЖХ-анализа // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51, № 2. С. 402–412. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-402-412>
11. Papademas P., Neokleous I., Mousikos P. Thermal processing of equine milk — a review // *Int. Dairy J.* 2023. Vol. 138. Article ID 105541. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105541>
12. Blanco-Doval A., Sousa R., Barron L.J.R., Portmann R., Egger L., Aldai N. Assessment of in vitro digestibility and postdigestion peptide release of mare milk in relation to different management systems and lactation stages // *J. Dairy Sci.* 2024. Vol. 107, N 10. P. 7594–7608. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2024-24807>
13. Musaev A., Sadykova S., Anambayeva A., Saizhanova M., Balkanay G., Kolbaev M. Mare's milk: composition, properties, and application in medicine // *Arch. Razi Inst.* 2021. Vol. 76, N 4. P. 1125–1135. DOI: <https://doi.org/10.22092/ari.2021.355834.1725>
14. Жарин В.А. Иммунокоррекция у пациентов с аллергией к белкам коровьего молока // Военная медицина. 2017. № 2. С. 44–49.
15. Narmuratova M., Berillo D., Narmuratova Z., Tarlykov P., Serikbayeva A., Kanayat S. Antihypertensive, anti-inflammatory, and anti-angiogenic in silico activity of lactoferrin-derived peptides of equine milk hydrolysate // *Biomedicines.* 2024. Vol. 12, N 12. P. 2715. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomedicines12122715>
16. Kocyigit E., Abdurakhmanov R., Kocyigit B.F. Potential role of camel, mare milk, and their products in inflammatory rheumatic diseases // *Rheumatol. Int.* 2024. Vol. 44, N 5. P. 425–434. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00296-023-05516-x>
17. Bimbetov B., Zhangabylov A., Aitbaeva S., Benberin V., Zollmann H., Musaev A. et al. Mare's milk: therapeutic and dietary properties // *Bull. Natl Acad. Sci. Rep. Kazakhstan.* 2019. Vol. 3, N 379. P. 52–58. DOI: <https://doi.org/10.32014/2019.2518-1467.68>
18. Jastrzębska E., Wadas E., Daszkiewicz T., Pietrzak-Fiećko R. Nutritional value and health-promoting properties of mare's milk — a review // *Czech J. Anim. Sci.* 2017. Vol. 62, N 12. P. 511–518. DOI: <https://doi.org/10.17221/61/2016-CJAS>
19. Симоненко Е.С., Симоненко С.В., Хованова Ю.С. Перспективы использования кобыльего молока для создания продуктов диетического лечебного и диетического профилактического питания // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 12 (114). С. 77–83. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.026>
20. Lou X., Shao W., Wu Y., Ma H., Chen H., Zheng N., Zhao Y. Peptidomic analysis of potential bioactive peptides in mare milk under different heat treatment conditions // *Foods.* 2024. Vol. 13, N 22. P. 3592. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13223592>
21. Barreto I.M.L., Rangel A.H.N., Urbano S.A., Bezerra J.D., Oliveira C.A.A. Equine milk and its potential use in the human diet // *Food Sci. Technol.* 2019. Vol. 39, N 1. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.11218>
22. Симоненко Е.С., Симоненко С.В., Гмошинский И.В., Ригер Н.А., Шумакова А.А., Зорин С.Н. Влияние лактоферрина и ферментативных гидролизатов белков коровьего и кобыльего молока на анафилактическую чувствительность и цитокиновый профиль крыс // Вопросы питания. 2024. Т. 93, № 2. С. 31–40. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-2-31-40>
23. Симоненко Е.С., Короткова Т.Н., Ворожко И.В., Сновская М.А., Гмошинский И.В., Симоненко С.В. Оценка аллергенности инновационных белковых компонентов продуктов для питания детей раннего возраста // Пищевые технологии : сборник тезисов III Международного симпозиума, посвященного 90-летию со дня рождения Л.А. Остроумова. Кемерово, 20–21 сентября 2024 года. Кемерово : Кемеровский государственный университет, 2024. С. 97–101.
24. Villa C., Costa J., Oliveira M.B.P.P., Mafra I. Bovine milk allergens: a comprehensive review // *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2018. Vol. 17, N 1. P. 137–164. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12318>

References

1. Zorin S.N. Enzymatic hydrolysates of foods for therapeutic and prophylactic nutrition. *Voprosy pitaniia* [Problems of Nutrition]. 2019; 88 (3): 23–31. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10026> (in Russian)
2. Cianferoni A., Spergel J.M. Food allergy: review, classification and diagnosis. *Allergol Int.* 2009; 58 (4): 457–66. DOI: <https://doi.org/10.2332/allergolint.09-RAI-0138>
3. Elghoudi A., Narchi H. Food allergy in children-the current status and the way forward. *World J Clin Pediatr.* 2022; 11 (3): 253–69. DOI: <https://doi.org/10.5409/wjcp.v11i3.253>
4. Gmoshinsky I.V., Zilova I.S., Zorin S.N., Demkina E.Yu. Membrane technologies — an innovative method of protein biological value increasing in young children feeding. *Voprosy sovremennoy pediatrii* [Problems of Modern Pediatrics]. 2012; 11 (3): 57–64. DOI: <https://doi.org/10.15690/vsp.v11i3.297> (in Russian)
5. Semenova E.S., Simonenko E.S., Simonenko S.V., Zorin S.N., Mazo V.K. Hydrolysates of mare's milk proteins. Immunochemical and physico-chemical characteristics. *Pishhevye sistemy* [Food Systems]. 2024; 7 (3): 466–72. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-466-472> (in Russian)
6. Kiewiet M.B., Gros M., Van Neerven R.J., Faas M.M., De Vos P. Immunomodulating properties of protein hydrolysates for application in cow's milk allergy. *Pediatr Allergy Immunol.* 2015; 26 (3): 206–17. DOI: <https://doi.org/10.1111/pai.12354>
7. Liu X., Jiang D., Peterson D.G. Identification of bitter peptides in whey protein hydrolysate. *J Agric Food Chem.* 2014; 62 (25): 5719–25. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf4019728>
8. Lei F., Zhao Q., Sun-Waterhouse D., Zhao M. Characterization of a salt-tolerant aminopeptidase from marine *Bacillus licheniformis* SWJS33 that improves hydrolysis and debittering efficiency for soy protein isolate. *Food Chem.* 2017; 214: 347–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.028>
9. Lajnaf R., Feki S., Ben Ameur S., Attia H., Kammoun T., Ayadi M.A., Masmoudi H. Recent advances in selective allergies to mammalian milk proteins not associated with Cow's Milk Proteins Allergy. *Food Chem Toxicol.* 2023; 178: 113929. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2023.113929>
10. Kurchenko V.P., Simonenko E.S., Sushynskaya N.V., Golovach T.N., Petrov A.N., Simonenko S.V. HPLC identification of mare's milk and its mix with cow's milk. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Technique and Technology of Food Production]. 2021; 51 (2): 402–2. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-402-412> (in Russian)

11. Papademas P., Neokleous I., Mousikos P. Thermal processing of equine milk – a review. *Int Dairy J.* 2023; 138: 105541. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105541>
12. Blanco-Doval A., Sousa R., Barron L.J.R., Portmann R., Egger L., Aldai N. Assessment of in vitro digestibility and postdigestion peptide release of mare milk in relation to different management systems and lactation stages. *J Dairy Sci.* 2024; 107 (10): 7594–608. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2024-24807>
13. Musaev A., Sadykova S., Anambayeva A., Saizhanova M., Balkanay G., Kolbaev M. Mare's milk: composition, properties, and application in medicine. *Arch Razi Inst.* 2021; 76 (4): 1125–35. DOI: <https://doi.org/10.22092/ari.2021.355834.1725>
14. Zharin V.A. Immunocorrection in patients with food allergy to cow's milk protein. *Voennaya meditsina [Military Medicine]*. 2017; (2): 44–9. (in Russian)
15. Narmuratova M., Berillo D., Narmuratova Z., Tarlykov P., Serikbayeva A., Kanayat S. Antihypertensive, anti-inflammatory, and anti-angiogenic in silico activity of lactoferrin-derived peptides of equine milk hydrolysate. *Biomedicines*. 2024; 12 (12): 2715. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomedicines12122715>
16. Kocyigit E., Abdurakhmanov R., Kocyigit B.F. Potential role of camel, mare milk, and their products in inflammatory rheumatic diseases. *Rheumatol Int.* 2024; 44 (5): 425–34. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00296-023-05516-x>
17. Bimbetov B., Zhangabylov A., Aitbaeva S., Benberin V., Zollmann H., Musaev A., et al. Mare's milk: therapeutic and dietary properties. *Bull Natl Acad Sci Rep Kazakhstan*. 2019; 3 (379): 52–8. DOI: <https://doi.org/10.32014/2019.2518-1467.68>
18. Jastrzębska E., Wadas E., Daszkiewicz T., Pietrzak-Fiećko R. Nutritional value and health-promoting properties of mare's milk – a review. *Czech J Anim Sci.* 2017; 62 (12): 511–8. DOI: <https://doi.org/10.17221/61/2016-CJAS>
19. Simonenko E.S., Simonenko S.V., Khovanova Yu.S. Prospects for the use of mare's milk in the development of dietary therapeutic and dietary preventive foods. *Mezhdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International Scientific Research Journal]*. 2021; 12 (114): 77–83. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.026> (in Russian)
20. Lou X., Shao W., Wu Y., Ma H., Chen H., Zheng N., Zhao Y. Peptidomic analysis of potential bioactive peptides in mare milk under different heat treatment conditions. *Foods*. 2024; 13 (22): 3592. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13223592>
21. Barreto I.M.L., Rangel A.H.N., Urbano S.A., Bezerra J.D., Oliveira C.A.A. Equine milk and its potential use in the human diet. *Food Sci Technol.* 2019; 39 (1): 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.11218>
22. Simonenko E.S., Simonenko S.V., Gmshinsky I.V., Riger N.A., Shumakova A.A., Zorin S.N. Influence of lactoferrin and enzymatic hydrolysates of cow's and mare's milk proteins on anaphylactic sensitivity and cytokine profile in rats. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2024; 93 (2): 31–40. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-2-31-40> (in Russian)
23. Simonenko E.S., Korotkova T.N., Vorozhko I.V., Snovskaya M.A., Gmshinsky I.V., Simonenko S.V. Assessment of allergenicity of innovative protein components for use in infant formulae. In: *Food Technologies: Collection of Abstracts of the III International Symposium dedicated to the 90th anniversary of the birth of L.A. Ostroumov*. Kemerovo, September 20–21, 2024. Kemerovo: Kemerovskiy gosudarstvenniy universitet, 2024: 97–101. (in Russian)
24. Villa C., Costa J., Oliveira M.B.P.P., Mafra I. Bovine milk allergens: a comprehensive review. *Compr Rev Food Sci Food Saf.* 2018; 17 (1): 137–64. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12318>

Для корреспонденции

Мартинчик Эвелина Арсеньевна – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник лаборатории витаминов и минеральных веществ ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»
 Адрес: 109240, Российская Федерация, г. Москва, Устьинский проезд, д. 2/14
 Телефон: (495) 698-53-30
 E-mail: emartinchik@ion.ru
<https://orcid.org/0009-0000-9835-2597>

Мартинчик Э.А., Вржесинская О.А., Жилинская Н.В.

Актуальные подходы к обоснованию допустимых уровней потребления витаминов и минеральных веществ

Current approaches for vitamins and minerals tolerable intake levels substantiation

Martinchik E.A., Vrzhesinskaya O.A., Zhilinskaya N.V.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, 109240, г. Москва, Российская Федерация

Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, 109240, Moscow, Russian Federation

На фоне возросшего интереса к обогащению пищевой продукции массового и специализированного сегментов рынка особенно актуальным становится вопрос о максимально допустимом уровне потребления витаминов и минеральных веществ и их количественном содержании в такой продукции. Сложность задачи установления допустимых пределов содержания этих микронутриентов в обогащенных пищевых продуктах и биологически активных добавках к пище (БАД) заключается в том, что такая продукция должна способствовать устранению дефицита микронутриентов, не вызывая при этом чрезмерного потребления как на популяционном, так и на индивидуальном уровне. Обоснование верхних допустимых уровней потребления (ВДУП) витаминов и минеральных веществ является ключевым элементом, позволяющим решить такую задачу. В Российской Федерации ВДУП витаминов и минеральных веществ не обновлялись более 17 лет.

Финансирование. Научно-исследовательская работа по подготовке рукописи проведена за счет средств субсидии на выполнение государственного задания в рамках Программы фундаментальных научных исследований (FGMF-2025-0006).

Конфликт интересов. Вржесинская О.А. является научным редактором и ответственным секретарем редакции журнала, остальные авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Вклад авторов. Концепция и дизайн исследования – Жилинская Н.В.; обработка материала и анализ полученных данных, подготовка рукописи – Мартинчик Э.А.; редактирование – Вржесинская О.А.; утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи – все авторы.

Для цитирования: Мартинчик Э.А., Вржесинская О.А., Жилинская Н.В. Актуальные подходы к обоснованию допустимых уровней потребления витаминов и минеральных веществ // Вопросы питания. 2025. Т. 94, № 6. С. 106–117. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-106-117>

Статья поступила в редакцию 19.06.2025. **Принята в печать** 25.11.2025.

Funding. The research was conducted under the subsidy for the state assignment implementation within the framework of the Fundamental Scientific Research Program (FGMF-2025-0006).

Conflict of interest. Vrzhesinskaya O.A. is a scientific editor and executive secretary of the journal's editorial board; the other authors declare no conflict of interest.

Contribution. Concept and design of the study – Zhilinskaya N.V.; processing of the material and analysis of the obtained data, preparation of the manuscript – Martinchik E.A.; editing – Vrzhesinskaya O.A.; approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article – all authors.

For citation: Martinchik E.A., Vrzhesinskaya O.A., Zhilinskaya N.V. Current approaches for vitamins and minerals tolerable intake levels substantiation. Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]. 2025; 94 (6): 106–117. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-106-117> (in Russian)

Received 19.06.2025. **Accepted** 25.11.2025.

Цель работы – проанализировать и обобщить актуальные подходы к обоснованию допустимых уровней потребления микронутриентов, в частности витаминов и минеральных веществ, а также других биологически активных веществ на основе оценки риска здоровью и обеспечения безопасности.

Материал и методы. Поиск литературы проведен на русском и английском языках с использованием базы данных рецензируемой научной литературы PubMed, российских электронных научных библиотек eLibrary и CyberLeninka, на официальном портале Европейского агентства по безопасности пищевых продуктов (EFSA).

Результаты. В статье охарактеризованы актуальные подходы к обоснованию допустимых уровней потребления витаминов и минеральных веществ на основе оценки риска. Проанализированы как научные публикации, так и регулирующие документы в области нормирования допустимых уровней потребления микронутриентов и других биологически активных компонентов. Приведен четырехэтапный алгоритм анализа рисков при установлении ВДУП витаминов и минеральных веществ, основанный на всесторонней оценке возможных неблагоприятных воздействий на организм человека. Показана необходимость актуализации ВДУП для следующих микронутриентов: витамин А (ретинол) и каротиноиды, витамин В₉ (фолаты), витамины D и C; макроэлементы – кальций, магний, калий; микроэлементы – йод и железо.

Заключение. Своевременная актуализация данных и учет последней научной информации в целях нормирования уровней потребления и, в свою очередь, нормирования содержания микронутриентов в пищевой продукции являются необходимым элементом обеспечения эффективности профилактики заболеваний с помощью обогащенной и специализированной пищевой продукции и БАД. Для витамина А (ретинол) и каротиноидов; витаминов В₉ (фолаты), D и C, макроэлементов (кальций, магний, калий); микроэлементов (йод и железо) целесообразно предусмотреть план мероприятий, позволяющих актуализировать существующие в Российской Федерации ВДУП в составе БАД и специализированной пищевой продукции для взрослого населения.

Ключевые слова: витамины; минеральные вещества; верхний допустимый уровень потребления; безопасный уровень потребления; анализ риска; оценка «риск–польза»

The upper tolerable intake levels (ULs) for vitamins and minerals and their content in the widely consumed foods and in a specialized nutrition (SN) become very relevant due to the growing interest in both segments fortification. The substantiation of these micronutrients' tolerance limits in fortified foods and dietary supplements (DS) is complicated by the fact that such products are dedicated to eliminate micronutrient deficiencies without excessive intake at the population and individual levels. ULs substantiation for vitamins and minerals is the key element in this issue resolving, while ULs of these micronutrients have not been updated for more than 17 years in the Russian Federation.

The aim of the research was to analyze and to summarize the current approach to the substantiation of micronutrient safe levels of intake based on health risk and safety assessment, in particular for vitamins and minerals, as well as for other bioactive compounds.

Material and methods. A literature search was conducted in Russian and in English using the peer reviewed sources database PubMed, Russian on-line scientific platforms eLibrary and CyberLeninka, official European Food Safety Authority (EFSA) on-line platform.

Results. The paper describes current approaches to safe intake level determination for micronutrients (vitamins and minerals) based on the risk assessment. Both scientific and regulatory sources in the field of setting safe levels of intake for micronutrients and bioactive compounds were reviewed. The four steps risk assessment process for establishing ULs for vitamins and minerals is given. The process is based on the complex assessment of possible adverse health effects on humans. The need to update the ULs is identified for the following micronutrients: vitamin A (retinol) and carotenoids, vitamin B₉ (folates), vitamins D and C; minerals – calcium, magnesium, potassium; trace elements – iodine and iron.

Conclusion. Actual data based on the latest scientific information for the purpose of consumption levels substantiation and, in turn, micronutrient content standardization in food – is a necessary element to ensure the disease prevention efficiency using fortified foods, SN and DS. For the vitamin A (retinol) and carotenoids; vitamins B₉ (folates), D and C; minerals (calcium, magnesium, potassium); trace elements (iodine and iron) – it is advisable to provide an action plan allowing to update the existing Russian ULs for DS and SN dedicated to the adult population.

Keywords: vitamins; minerals; trace elements; upper tolerable intake level; safe level of intake; risk analysis; risk–benefit assessment

За более чем 100-летнюю историю изучения витаминов и минеральных веществ наука кардинально продвинулась в понимании не только химической структуры, различных форм, основ метаболизма, но и в целом роли этих микронутриентов в питании и обеспечении здоровья человека. Проблема адекватной обеспеченности населения витаминами и минеральными веществами по-прежнему сохраняет свою актуальность, она затрагивает как развивающиеся, так и экономически развитые страны во всех регионах планеты [1–3].

Фортификация пищевых продуктов и применение биологически активных добавок (БАД) к пище, в том числе витаминно-минеральных комплексов, являются одними из наиболее эффективных способов решения проблемы дефицита микронутриентов на популяционном уровне и обеспечивают разумный подход в поддержании сбалансированного состава рациона современного человека [4–6]. Обязательное обогащение некоторых видов пищевых продуктов массового потребления практикуется уже в течение нескольких десятилетий в ряде стран для профилактики возникновения конкретных заболеваний, например йодированная соль для предотвращения зоба, обогащение молочной продукции витамином D для предупреждения остеопороза, муки витаминами группы В прежде всего для снижения частоты врожденных дефектов (дефект нервной трубки) и других заболеваний [7–9]. Добровольное обогащение пищевых продуктов (т.е. по инициативе изготовителей пищевой продукции) также играет положительную роль в обеспечении общественного здоровья, однако важно, чтобы такая фортификация была направлена не только на маркетинговое преимущество компании, но и соответствовала требованиям политики в области здорового питания [10]. Таким образом, следует обратить особое внимание на количественное содержание витаминов и минеральных веществ с учетом допустимых верхних и нижних пределов, а также на подходы к маркировке обогащенной пищевой продукции в массовом и специализированном сегментах [11, 12].

Витамины и минеральные вещества являются эссенциальными микронутриентами, они необходимы для нормального функционирования организма человека, и, следовательно, неблагоприятные эффекты могут возникнуть в результате как недостаточного их потребления или дефицита, так и в результате чрезмерного потребления. В этой связи особую значимость приобретает учет потребностей уязвимых групп населения, например женщин репродуктивного возраста или детей и других чувствительных категорий. Поэтому в отношении витаминов и минеральных веществ цель любого нормирования должна состоять в том, чтобы вероятность недостаточного или избыточного потребления населением определенного микронутриента сводилась к минимуму, т.е. охват должен быть, с одной стороны, максимальным, с другой – включать наиболее уязвимые группы. При этом важно обеспечить баланс между предосторожностью и реалистично-

стью, чтобы избежать как занижения, так и завышения допустимых уровней, что в корне отличает подход к оценке рисков и нормированию витаминов и минеральных веществ от оценки риска и нормирования ксенобиотиков [13–15].

В настоящее время в Российской Федерации обязательному обогащению (йодированию) подлежит только соль, используемая при приготовлении блюд и кулинарных изделий в организациях общественного питания детей в организованных детских коллективах (согласно СанПиН 2.3/2.4.3590-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организации общественного питания населения»). Остальные виды продукции производители могут обогащать микронутриентами на добровольной основе. При этом содержание витаминов и минеральных веществ в разных видах пищевой продукции регламентируется различными документами, в ряде которых отмечается некоторая противоречивость как количественных показателей, так и используемой терминологии. Так, в ТР ТС 022/2011 «Пищевая продукция в части ее маркировки» (приложение 2), «Единых санитарно-эпидемиологических и гигиенических требований к продукции (товарам), подлежащей санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю)» (приложение 5) и МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации» присутствуют разногласия по нормативу (размеру суточного потребления для взрослых) в отношении цинка (12–15 мг/сут), витаминов С (60–100 мг/сут) и D (5–15 мкг/сут), причем норма физиологической потребности (НФП) для последнего для лиц старше 65 лет (20 мкг/сут) согласно МР 2.3.1.0253-21 превышает верхний допустимый уровень потребления (ВДУП, 15 мкг/сут) в составе специализированных пищевых продуктов (СПП) и БАД к пище, установленный «Едиными санитарно-эпидемиологическими и гигиеническими требованиями к продукции (товарам), подлежащей санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю)». ВДУП микронутриентов приведен только для взрослых в составе СПП и БАД к пище (приложение 5 «Единых санитарно-эпидемиологических и гигиенических требований к продукции (товарам), подлежащей санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю)» и МР 2.3.1.1915-04), для определенных категорий специализированной продукции отдельные лимиты содержания некоторых микронутриентов приведены в ряде Технических регламентов. Такая ситуация требует разработки единого подхода к определению максимально допустимых безопасных уровней потребления витаминов и минеральных веществ.

Цель работы – проанализировать и обобщить актуальные подходы к обоснованию допустимых уровней потребления микронутриентов, в частности витаминов и минеральных веществ, а также других биологически активных веществ на основе оценки риска здоровью и обеспечения безопасности.

Материал и методы

Поиск литературы проведен на русском и английском языках с использованием баз данных рецензируемой научной литературы PubMed и российских электронных научных библиотек eLibrary и CyberLeninka по ключевым словам: витамины, минеральные вещества, верхний допустимый уровень потребления, безопасный уровень потребления, анализ риска, оценка «риск-польза» (vitamins, minerals, upper tolerable intake level, safe level of intake, risk analysis, risk-benefit assessment), а также на официальном портале Европейского агентства по безопасности пищевых продуктов (EFSA). Проанализировано более 278 статей, из которых отобрано 55 публикаций, из них 33 не старше 10 лет.

Результаты и обсуждение

Традиционный подход к установлению допустимых пределов содержания витаминов, минеральных веществ и других биологически активных компонентов основывается на оценке величин потребления. Метод, используемый специалистами в области питания по всему миру при прогнозировании потребления витаминов и минеральных веществ, заключается в распределении потребления изучаемого микронутриента по отношению к разным градациям величин потребления, и результаты, как правило, различаются в зависимости от пола и возраста [16, 17].

Согласно рекомендациям Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) в качестве точек отсечения распределения величин потребления используются расчетная средняя потребность (PCП) (estimated average requirement, EAR) и ВДУП (Tolerable Upper Intake Level) [18]. Считается, что потребление ниже PCП (EAR) отражает риски недостаточности, а потребление выше ВДУП (UL) указывает на риск избыточного потребления. В данном контексте подход российских ученых не является исключением, и, как правило, точкой отсечения является, по нашей терминологии, НФП или адекватный уровень потребления. Основная цель при таком подходе – спрогнозировать распределение величин потребления населением вносимого в пищу компонента таким образом, чтобы распространенность потребления ниже PCП и выше ВДУП была бы минимальной. Для некоторых микронутриентов, таких как витамин А или цинк, диапазон между PCП и ВДУП относительно невелик и может отличаться для разных групп населения [19]. Для таких веществ увеличение их потребления путем массового обогащения пищевых продуктов может представлять собой дилемму: недопущение превышения ВДУП дает уверенность в безопасности для широкого круга населения, но может потенциально оставить часть целевой аудитории с неудовлетворенными потребностями. Или, наоборот, при покрытии потребности целевой аудитории в этих веществах у других групп населения могут возникнуть риски чрезмерного потребления.

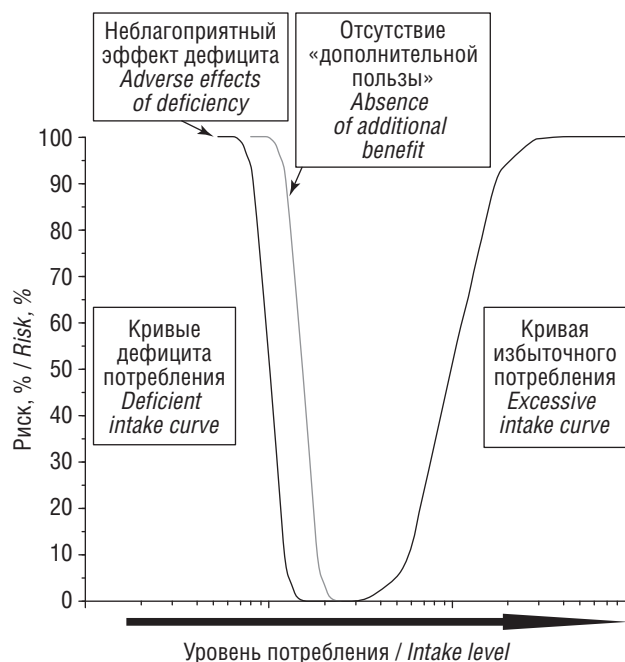


Рис. 1. Пример кривых дефицита и избыточного потребления, адаптировано по A. Renwick и соавт. [21]

Fig. 1. Deficient and excessive intake curves example, adapted from A. Renwick et al. [21]

С учетом описанных выше особенностей, в последние два десятилетия активно ведется разработка и адаптация более комплексного подхода к установлению допустимых пределов потребления – анализ риска. Концепция анализа рисков развивается в разных областях науки на протяжении многих лет. Применительно к витаминам и минеральным веществам первые публикации появились уже в конце 1990-х гг., где была показана систематическая оценка рисков, связанных с ВДУП [20]. В 2004 г. вышла знаковая публикация коллектива авторов в рамках проекта ILSI «Addition of Nutrients to Food», полностью посвященная подходам к сравнению полезных и неблагоприятных эффектов при различных уровнях потребления микронутриентов [21]. A.G. Renwick и соавт. показали, что при определении оптимального диапазона потребления микронутриента следует учитывать 2 аспекта: во-первых, минимальное количество, необходимое организму для нормальной функции, т.е. «польза», и, во-вторых, максимальное количество, все еще совместимое с нормальной функцией, обозначенное авторами как «риск». Далее авторы наглядно продемонстрировали сравнение «риск-польза», при котором риск для здоровья, возникающий из-за недостаточного потребления, сопоставляется с риском для здоровья из-за чрезмерного потребления и добавили еще одно сравнение риска с пользой, где термин «польза» также относится и к отсутствию известной «дополнительной пользы», т.е. такого положительного эффекта микронутриента, который проявляется в дополнение к общепризнанному благоприятному влиянию (рис. 1). Соответственно, диапазон приемлемого потребления будет таким, который обеспечивает низкую

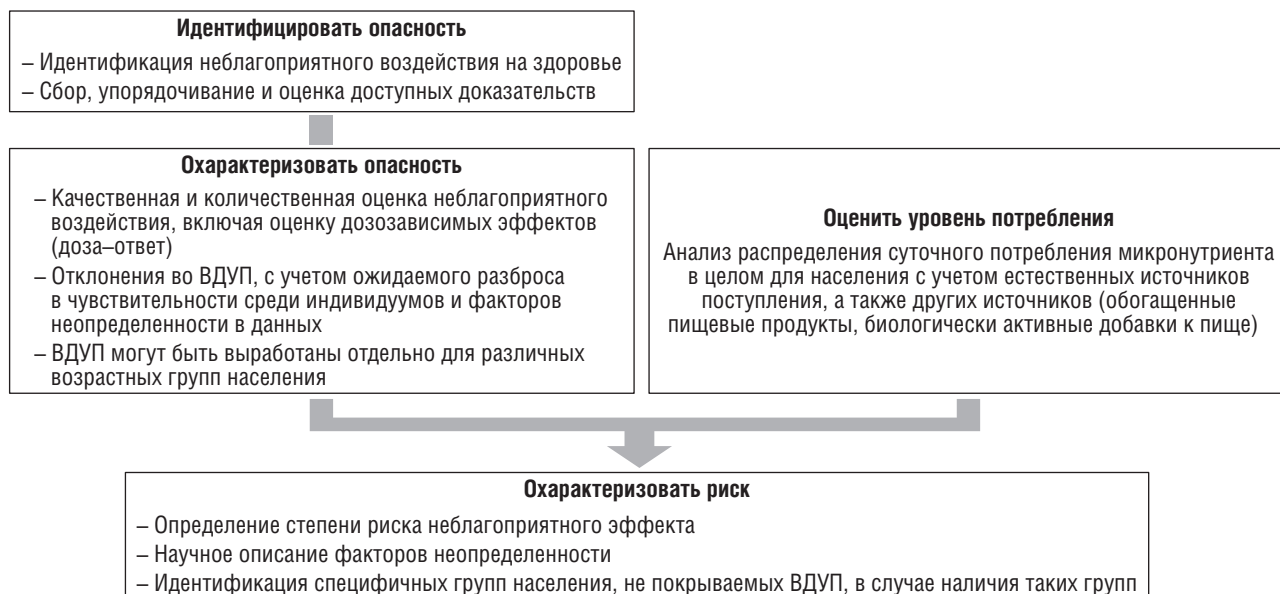


Рис. 2. Четырехэтапный процесс оценки рисков [25]

ВДУП – верхний допустимый уровень потребления.

Fig. 2. Four steps of the Risk assessment process [25]

частоту неблагоприятных последствий для здоровья, возникающих либо вследствие слишком низкого потребления (дефицит или отсутствие дополнительной пользы для здоровья), либо слишком высокого потребления (токсичность).

В целом задача метода анализа «риск–польза» – это учет различных сценариев потребления изучаемого микронутриента, помощь в попытке уравновесить между собой величину потенциальных преимуществ для здоровья от сокращения недостаточного потребления с рисками для здоровья при чрезмерном употреблении. При таком комплексном подходе анализируется максимально доступное количество материалов и данных различных исследований, оценивающих риск для здоровья, включая тяжесть неблагоприятных эффектов, их обратимость, количество затрагиваемых негативным эффектом людей. Данный подход позволяет выявить случаи, когда неблагоприятные последствия для здоровья при потреблении ниже РСП и выше ВДУП могут существенно различаться по своей тяжести [22]. Например, первый неблагоприятный эффект, который наблюдается на верхнем уровне потребления, определяющем ВДУП, может быть нетяжелым и обратимым и включать широкий запас безопасности, тогда как первый неблагоприятный эффект, наблюдаемый на нижнем пределе потребления, определяющем РСП, может быть более тяжелым, или наоборот.

Параллельно с научным поиском, регуляторы по всему миру работают над созданием и совершенствованием практических руководств по выработке ВДУП и проведению качественного анализа рисков при установлении максимальных и минимальных уровней потребления и, соответственно, максимально допустимых уровней содержания микронутриентов в таких видах пищевой продукции, как БАД к пище и СПП.

Базовые принципы установления ВДУП были предложены Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных Наций (ФАО/ВОЗ) в 2005 г. в Отчете Совместного технического семинара ФАО/ВОЗ по оценке риска пищевых продуктов под названием «Модель установления верхних уровней потребления пищевых веществ и связанных с ними веществ» (ФАО/ВОЗ, 2006) [23]. Они, в свою очередь, разрабатывались с учетом научно обоснованных подходов, опубликованных в разных странах [20, 24]. Анализ риска (Risk analysis), связанного с питанием, состоит из 3 отдельных, но тесно взаимосвязанных процессов: оценка риска (Risk assessment), управление риском (Risk management), коммуникация риска (Risk communication) [23]. Процесс оценки риска является ключевым для понимания характера неблагоприятного воздействия на здоровье и определения уровней потребления, при которых неблагоприятные эффекты возникают, а значит, и ключевым для установления допустимых пределов содержания в пищевой продукции и БАД к пище.

В контексте гармонизации законодательства между странами – участниками Европейского союза научный комитет Европейского агентства по безопасности пищевых продуктов (EFSA) представил в 2024 г. Руководящие принципы обоснования ВДУП для витаминов и минеральных веществ [25] и Руководство по оценке риск–польза для пищевой продукции [26]. При составлении перечисленных руководств был систематизирован опыт практического применения предварительной версии, которая была опубликована в 2022 г. [27]. Были максимально учтены известные на сегодняшний день аспекты планирования и реализации процесса оценки риска. Алгоритм четырехэтапного процесса оценки риска представлен на рис. 2.

На первом и втором этапах оценки риска стоит задача извлечь максимально доступное количество информации начиная с обозначения проблемы, определения методов поиска и систематизации информации, учета слабых и сильных сторон каждого исследования, учета количественного фактора неопределенности при экстраполяции данных или при наличии слабых сторон, например вариабельности данных. Результатом 2 этапов будет идентификация опасности и ее качественное и количественное описание, в том числе обоснование того уровня потребления, который, согласно источникам, не вызовет неблагоприятный эффект – ВДУП.

Важно отметить, что для некоторых микронутриентов не получится установить ВДУП, так как будут отсутствовать качественные исследования, пригодные для идентификации неблагоприятных воздействий на здо-

ровье, например отсутствие данных о дозозависимых эффектах (доза–ответ) [25, 26]. Для таких случаев ФАО/ВОЗ предлагает использовать термин «высшее наблюдаемое потребление» (Highest observed intake), а EFSA использует термин «безопасный уровень потребления» (БУП, Safe level of intake) [23, 26]. По смыслу оба означают тот уровень потребления, при котором не наблюдалось неблагоприятных эффектов по данным оценки фактического питания населения, из которых, в свою очередь, берутся данные по 95-му процентилю суточного потребления. Важно отметить, что ВДУП отличается от БУП тем, что не просто безопасен, а основывается на действительно максимально допустимом пределе потребления, выше которого однозначно наступает неблагоприятный эффект. В таблице приведены данные о ВДУП и/или БУП, установленных на данный момент в разных странах.

Верхний допустимый уровень потребления витаминов и минеральных веществ для взрослых

Upper tolerable intake level of vitamins and minerals for adults

Микронутриент <i>Micronutrient</i>	ЕС / EU [28–37]	США / USA [38–42]	Великобритания / UK [24]	РФ / RF ¹
Витамин А (ретинол), мкг/сут <i>Vitamin A (retinol), µg/day</i>	3000 ²	3000	–	3000 ²
β-Каротин мкг/сут / β-Carotene, mg/day ³	–	–	7 ³	–
Витамин D, мкг/сут / <i>Vitamin D, µg/day</i>	100 мкг ВДЭ ⁴ /сут 100 µg VDE ⁴ /day	100	25 (БУП / GL)	50
Витамин Е (α-токоферол), мг/сут <i>Vitamin E (α-tocopherol), mg/day</i>	300 ⁵	1000	540	300
Витамин К ₁ , мг/сут / <i>Vitamin K₁, mg/day</i>	–	–	1 (БУП / GL)	–
Витамин В ₁ , мг/сут / <i>Vitamin B₁, mg/day</i>	–	–	100 (БУП / GL)	–
Витамин В ₂ , мг/сут / <i>Vitamin B₂, mg/day</i>	–	–	43 (БУП / GL)	–
Витамин В ₆ , мг/сут / <i>Vitamin B₆, mg/day</i>	12	100	10	25
Витамин В ₁₂ , мкг/сут / <i>Vitamin B₁₂, µg/day</i>	Отрицательных эффектов не выявлено <i>No defined adverse effects</i>	–	2000 (БУП / GL)	–
Никотиновая кислота, мг/сут <i>Nicotinic acid, mg/day</i>	10 ⁶	35	17 (БУП / GL)	–
Никотинамид, мг/сут <i>Nicotinamide, mg/day</i>	900 ⁶	35	560 (БУП / GL)	60
Фолиевая кислота, мкг/сут <i>Folic acid, µg/day</i>	1000 ⁷	1000	1000 (БУП / GL)	1000
Витамин С, мг/сут <i>Vitamin C, mg/day</i>	–	2000	1000 (БУП / GL)	2000
Пантотеновая кислота, мг/сут <i>Pantothenic acid, mg/day</i>	–	–	210 (БУП / GL)	–
Биотин, мкг/сут / <i>Biotin, µg/day</i>	–	–	900 (БУП / GL)	–
Кальций, мг/сут / <i>Calcium, mg/day</i>	2500	2500 (19-50 лет years old)	1500 (БУП / GL)	2500
Фосфор, мг/сут / <i>Phosphorus mg/day</i>	–	4000 (19-70 лет years old)	2400 (БУП / GL)	–
Магний, мг/сут / <i>Magnesium, mg/day</i>	250 ⁸	350 ⁹	400 ⁹ (БУП / GL)	–
Калий, мг/сут / <i>Potassium, mg/day</i>	–	–	3700 ⁹ (БУП / GL)	–
Селен, мкг/сут / <i>Selenium, µg/day</i>	255	400	450	300
Йод, мкг/сут / <i>Iodine, µg/day</i>	600	1100	930 (БУП / GL)	600
Хром (III), мг/сут <i>Chromium (III), mg/day</i>	–	–	10 (БУП / GL)	–

Окончание таблицы

Микронутриент <i>Micronutrient</i>	ЕС / EU [28–37]	США / USA [38–42]	Великобритания / UK [24]	РФ / RF ¹
Марганец, мг/сут / <i>Manganese, mg/day</i>	8 (БУП / SL)	11	12,2 (БУП / GL)	5
Молибден, мг/сут / <i>Molybdenum, mg/day</i>	0,6	2	–	0,6
Медь, мг/сут / <i>Copper, mg/day</i>	5 ¹⁰	10	10	5
Железо, мг/сут / <i>Iron, mg/day</i>	40 (БУП / SL)	45	17 ⁹ (БУП / GL)	–
Цинк, мг/сут / <i>Zinc, mg/day</i>	25	40	25 ⁹	25
Бор, мг/сут / <i>Boron, mg/day</i>	10	20	9,6	–

БУП – безопасный уровень потребления.

Примечание. ¹ МР 2.3.1.2432-08 Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. Методические рекомендации от 18.12.2008. Заменен с 22.07.2021 на МР 2.3.1.0253-21.

² Ретинол-эквивалент.

³ Курильщикам следует избегать употребления β-каротина с обогащенными продуктами и БАД к пище. Экспертная панель Европейского агентства по безопасности пищевых продуктов (EFSA) по питанию, новым источникам пищи и пищевой аллергии предполагает, что употребление β-каротина населением с обогащенными продуктами и БАД к пище должно быть ограничено с целью не допустить превышения требований по ВДУП витамина А.

⁴ Витамин D эквивалент (ВДЭ), при котором 1 мкг ВДЭ = 1 мкг холекальциферола (витамина D₃) = 1 мкг эргокальциферола (витамина D₂) = 0,4 мкг моногидрата кальцидиола = 40 МЕ. Для моногидрата кальцидиола формула распространяется при употреблении не более 10 мкг/сут.

⁵ ВДУП распространяется на все стереоизомеры α-токоферола.

⁶ За исключением беременных и кормящих.

⁷ Фолиевая кислота, 5-метил-тетрагидрофолата глюкозаминовая соль, l-5-метил-тетрагидрофолат кальция.

⁸ Включает растворимые соли магния (например, хлорид, сульфат, аспартат, лактат) и соединения элемента, добавляемые в БАД к пище, воду или пищевую продукцию, например MgO; не включает нативный Mg из пищевой продукции и напитков.

⁹ Добавленный.

¹⁰ За исключением беременных и кормящих. В 2023 г. научный комитет Европейского агентства по безопасности пищевых продуктов (EFSA) установил 0,07 мг/кг массы тела как допустимое суточное потребление меди (EFSA Scientific Committee, 2023).

SL – safe level; GL – guidance level.

NOTE. ¹ MR 2.3.1.2432-08 Norms of physiological requirements in energy and nutrients in various groups of population in Russian Federation. Methodical recommendations from 18.12.2008. Replaced from 22.07.2021 by MR 2.3.1.0253-21.

² Retinol-equivalent.

³ Smokers should avoid consuming food supplements containing β-carotene. The Panel also considers that the use of supplemental β-carotene (i.e., in fortified foods and/or food supplements) by the general population should be limited to the purpose of meeting vitamin A requirements.

⁴ As vitamin D equivalent (VDE), so that 1 μg VDE = 1 μg cholecalciferol (vitamin D₃) = 1 μg ergocalciferol (vitamin D₂) = 0.4 μg calcidiol monohydrate = 40 IU. This applies to calcidiol monohydrate at doses up to 10 μg/day.

⁵ ULs apply to all stereoisomeric forms of α-tocopherol.

⁶ Except pregnant and lactating.

⁷ Folic acid, 5-MTHF-glucosamine and l-5-MTHF-Ca.

⁸ Readily dissociable Mg salts (e.g. chloride, sulphate, aspartate, lactate) and compounds like MgO in food supplements, water or added to foods; does not include Mg naturally present in foods and beverages.

⁹ Supplementary sources.

¹⁰ Except pregnant and lactating. In 2023, the EFSA Scientific Committee established an Acceptable Daily Intake (ADI) of 0.07 mg/kg body weight copper (EFSA Scientific Committee, 2023).

Как уже было отмечено, важным этапом в комплексной оценке данных, которая позволит охарактеризовать риски, связанные с употреблением изучаемого витамина или минерального вещества, будет этап оценки уровня его потребления из всех пищевых источников: обычные пищевые продукты, обогащенные продукты, включая СПП, БАД к пище (в том числе витаминно-минеральные комплексы), вода.

Завершающим этапом является компиляция данных, полученных на предыдущих 3 этапах: рассчитанные ВДУП или, по крайней мере, БУП с учетом факторов неопределенности, уровни потребления из данных оценки фактического питания с учетом поступления витаминов и минеральных элементов с пищей, водой и витаминно-минеральными комплексами. Этот этап позволяет дать

четкую научно подтвержденную характеристику риска изучаемого витамина или минерального вещества, а именно: обоснованные ВДУП или БУП, группы населения, подверженные риску превышения ВДУП или БУП; природу и степень тяжести неблагоприятного воздействия на здоровье и научное описание факторов неопределенности.

В Российской Федерации сложилась практика установления ВДУП для витаминов и минеральных веществ в составе БАД и СПП, что имеет право на существование с учетом наличия процесса государственной регистрации производимой и ввозимой продукции такого рода. Подход к выработке ВДУП в составе специализированной продукции также требует оценки максимального поступления со всеми источниками, чтобы обосно-

вать максимальный уровень в составе БАД к пище, СПП и обогащенной продукции. Важно отметить, что данные в Евразийском экономическом союзе и Российской Федерации по ВДУП витаминов и минеральных веществ не обновлялись уже более 17 лет. В настоящее время обсуждается проект изменений в Единые санитарные, санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к продукции (товарам), подлежащей санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю), в рамках актуализации ряда Технических регламентов. В связи с этим целесообразно пересмотреть ВДУП ряда витаминов и минеральных веществ и, с одной стороны, более гибко подойти к учету интересов разных возрастных групп, включая лиц со специальными потребностями, а также с учетом накопленных данных о тех эффектах микронутриентов, которые проявляются в дополнение к общепризнанному благоприятному влиянию при условии достижения определенных уровней обеспеченности организма, а с другой стороны – при необходимости снизить ВДУП для ряда микронутриентов в составе БАД к пище и СПП с учетом других источников поступления.

В Российской Федерации, по нашему мнению, можно выделить следующие приоритетные витамины и минеральные вещества, требующие уточнения ВДУП и нормирования содержания в продукции: это витамин А (ретинол) и каротиноиды; витамин В₉ (фолаты), витамины D, С, макроэлементы – кальций, магний, калий; микроэлементы – йод и железо. Для этих микронутриентов, имеющих ключевое значение в обеспечении физиологических функций организма человека, зачастую на фоне их недостаточного потребления характерен достаточно узкий диапазон между рекомендуемым уровнем потребления и ВДУП.

Накапливается все больше данных о пользе одновременной оптимальной обеспеченности организма, т.е. оптимального содержания в биологических жидкостях и тканях витаминов А, Е, С и каротиноидов и их соотношения между собой, для профилактики сердечно-сосудистых и ряда других алиментарных заболеваний, в то же время – о повышении риска остеопороза, особенно у женщин пожилого возраста, при избыточном потреблении ретинола, что послужило одним из оснований снижения НФП для женщин в 2021 г. [43–46]. При этом не вызывает сомнения польза оптимального поступления каротиноидов за счет свежих овощей и фруктов, однако повышение риска побочных эффектов у некоторых групп населения при включении в рацион продукции, содержащей эти добавленные микронутриенты, диктует необходимость анализа и учета раздельного поступления витамина А как в форме ретинола и его эфиров, так и в форме провитамина (каротиноидов) из источников их природного происхождения и из продукции, содержащей добавленные формы. Это же касается и витамина В₉ (фолаты). Недостаточное поступление фолатов с пищей критично для особых групп населения, например женщин репродуктивного возраста, при этом для фолиевой кислоты – основной формы обогащающей добавки этого витамина – также свойственен не очень широкий коридор между рекомендуемым уровнем потребления и ВДУП.

Аналогичные особенности характерны и для группы макроэлементов – кальций, магний, калий. В настоящее время все больше научных данных свидетельствует о благоприятном влиянии оптимального содержания калия и магния в сыворотке крови на снижение риска развития сердечно-сосудистых заболеваний [47]. Кроме того, установлена важность соотношения концентраций в крови магния и кальция для поддержания гомеостаза кальция [48, 49]. При этом нужно учитывать, что соли магния, применяющиеся при обогащении этим макроэлементом, обладают слабительным эффектом, а избыточное потребление кальция грозит гиперкальциемией. Таким образом, возникает потребность в актуализации научно обоснованного подхода к установлению допустимых уровней обогащения пищевой продукции макроэлементами, с обязательным учетом особенностей питания и потребностей уязвимых групп населения, как, например, подростки и лица пожилого возраста, которые нуждаются в повышенном внимании в контексте потребления кальция и его решающего значения в формировании костной массы и в профилактике остеопороза.

Витамин D, микроэлементы железо и йод во многих случаях характеризуются дефицитом потребления, ограниченным диапазоном между рекомендуемым потреблением и ВДУП, а также наряду с витамином С повышенным вниманием со стороны специалистов в области питания, медицинского сообщества, производителей пищевой продукции и потребителей. Одним из наиболее дефицитных нутриентов в Российской Федерации является витамин D. Согласно данным популяционных исследований значительная часть населения испытывает его недостаток [50]. Учитывая многочисленные внескелетные функции витамина D, включая участие в иммунной регуляции, достижение оптимального уровня его поступления в организм человека является важной задачей, особенно в условиях климатических и географических особенностей страны. При этом продолжают дискуссии о необходимых уровнях обогащения пищевой продукции витамином D с учетом его эндогенного синтеза под воздействием ультрафиолетового излучения [51]. Витамин С, микроэлементы железо и йод также находятся в зоне пристального внимания. Витамин С широко используется в практике добровольного обогащения пищевых продуктов, особенно в категории напитков [52]. Более того, это один из витаминов, который может использоваться в качестве пищевой добавки – антиоксиданта. А с учетом того, что в Российской Федерации верхний допустимый уровень суточного потребления витамина С в составе СПП и БАД к пище составляет 900 мг, а он пользуется особым интересом у потребителей в качестве антиоксиданта, и при этом НФП в 2021 г. была повышена до 100 мг/сут, анализ поступления этого витамина с его природными источниками и с обогащенной продукцией у разных групп населения остается весьма актуальным. Вопрос обогащения пищевой продукции йодом все еще находится на повестке, поскольку в Российской Федерации йодирование соли не является обязательным, и эффективность действующей добровольной модели вызывает полемику среди специа-

листов. Рассматривается необходимость перехода к обязательному йодированию соли для повышения охвата населения и профилактики йододефицитных состояний [53]. Железо остается чувствительной темой для уязвимых групп населения – детей, женщин репродуктивного возраста и беременных [54]. Дефицит железа и связанная с ним железодефицитная анемия представляют серьезную медико-социальную проблему, требующую междисциплинарного подхода к профилактике и коррекции. При этом ключевым элементом профилактики выступает алиментарный фактор – достаточное поступление железа с пищей и обогащенными продуктами. Однако, учитывая повышенное содержание железа в питьевой воде в ряде регионов, а также меньшую физиологическую потребность в нем у мужчин, возникает необходимость в детальном анализе ситуации с целью предотвращения возможных рисков для здоровья [55].

Заключение

Обогащенная пищевая продукция, БАД к пище и СПП являются важным звеном профилактики алиментарно-зависимых заболеваний. Своевременная актуализация

данных и учет последней научной информации в целях нормирования уровней потребления микронутриентов и, в свою очередь, нормирования их содержания в потребляемой продукции являются необходимым элементом повышения эффективности такой профилактики. Проведенное исследование выявило потребность обновления ВДУП для ряда витаминов и минеральных веществ с учетом максимально доступных данных о раздельном поступлении различных форм этих микронутриентов (из природных источников, из продуктов с добавленными формами) и с учетом накопленных данных об их дополнительной пользе или, наоборот, дополнительных ограничениях. Для витамина А (ретинол) и каротиноидов; витамина В₉ (фолаты), витаминов D, С, макроэлементов – кальция, магния, калия, микроэлементов – йода и железа – необходимо разработать план мероприятий, позволяющих обновить существующие ВДУП в составе БАД к пище и СПП для взрослого населения. Актуализированные ВДУП должны стать основой не только для внесения изменений в существующие нормативные документы, но и для работы в рамках новых законодательных инициатив, таких как разрешение назначения БАД медицинскими работниками при наличии показаний.

Сведения об авторах

ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (Москва, Российская Федерация):

Мартинчик Эвелина Арсеньевна (Evelina A. Martinchik) – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник лаборатории витаминов и минеральных веществ

E-mail: emartinchik@ion.ru

<https://orcid.org/0009-0000-9835-2597>

Вржесинская Оксана Александровна (Oksana A. Vrzhesinskaya) – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории витаминов и минеральных веществ

E-mail: vr.oksana@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8973-8153>

Жилинская Наталья Викторовна (Natalya V. Zhilinskaya) – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией витаминов и минеральных веществ

E-mail: zhilinskayanataliya@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1596-1213>

Литература

1. Mensink G.B., Fletcher R., Gurinovic M., Huybrechts I., Lafay L., Serra-Majem L. et al. Mapping low intake of micronutrients across Europe // *Br. J. Nutr.* 2013. Vol. 110, N 4. P. 755–773. DOI: <https://doi.org/10.1017/S000711451200565X>
2. Коденцова В.М., Вржесинская О.А., Рисник Д.В., Никитюк Д.Б., Тутельян В.А. Витаминная обеспеченность взрослого населения Российской Федерации: 1987–2017 гг. // *Вопросы питания.* 2018. Т. 87, № 4. С. 62–68. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2018-10043>
3. Inui T., Hanley B., Tee E.S., Nishihira J., Tontisirin K., Van Dael P. et al. The role of micronutrients in ageing Asia: what can be implemented with the existing insights // *Nutrients.* 2021. Vol. 13, N 7. P. 2222. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu13072222>
4. Коденцова В.М., Жилинская Н.В., Салагай О.О., Тутельян В.А. Специализированные витаминно-минеральные комплексы для лиц, находящихся в экстремальных условиях // *Вопросы питания.* 2022. Т. 91, № 6. С. 6–16. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-6-6-16>
5. Коденцова В.М., Жилинская Н.В., Шпигель Б.И. Витаминология: от молекулярных аспектов к технологиям витаминизации детского и взрослого населения // *Вопросы питания.* 2020. Т. 89, № 4. С. 89–99. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10045>
6. Olson R., Gavin-Smith B., Ferraboschi C., Kraemer K. Food fortification: the advantages, disadvantages and lessons from sight and life programs // *Nutrients.* 2021. Vol. 13, N 4. P. 1118. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu13041118>
7. Wu T., Liu G. J., Li P., Clar C. Iodised salt for preventing iodine deficiency disorders // *Cochrane Database Syst. Rev.* 2002. Vol. 2002, N 3. CD003204. DOI: <https://doi.org/10.1002/14651858.CD003204>
8. Itkonen S.T., Erkkola M., Lamberg-Allardt C.J.E. Vitamin D fortification of fluid milk products and their contribution to vitamin D intake and vitamin D status in observational studies – a review // *Nutrients.* 2018. Vol. 10, N 8. P. 1054. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu10081054>
9. Коденцова В.М., Вржесинская О.А. Анализ отечественного и международного опыта использования обогащенных витаминами пищевых продуктов // *Вопросы питания.* 2016. Т. 85, № 2. С. 31–50. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2016-00021>
10. Fletcher R.J., Bell I.P., Lambert J.P. Public health aspects of food fortification: a question of balance // *Proc. Nutr. Soc.* 2004. Vol. 63, N 4. P. 605–614. DOI: <https://doi.org/10.1079/pns2004391>

11. Datta M., Vitolins M.Z. Food Fortification and supplement use – are there health implications? // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2016. Vol. 56, N 13. P. 2149–2159. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.818527>
12. Жилинская Н.В., Громовых П.С. Фортификация пищевой продукции — глобальный тренд пищевой промышленности // *Пищевая промышленность: наука и технологии.* 2019. Т. 12, № 3. С. 31–35.
13. Flynn A., Moreiras O., Stehle P., Fletcher R.J., Muller D.J., Rolland V. Vitamins and minerals: a model for safe addition to foods // *Eur. J. Nutr.* 2003. Vol. 42, N 2. Article ID 11830. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00394-003-0391-9>
14. Kloosterman J., Fransen H.P., de Stoppelaar J., Verhagen H., Rompelberg C. Safe addition of vitamins and minerals to foods: setting maximum levels for fortification in The Netherlands // *Eur. J. Nutr.* 2007. Vol. 46, N 4. P. 220–229. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00394-007-0654-y>
15. Rasmussen S.E., Andersen N.L., Dragsted L.O., Larsen J.C. A safe strategy for addition of vitamins and minerals to foods // *Eur. J. Nutr.* 2006. Vol. 45, N 3. P. 123–135. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00394-005-0580-9>
16. Institute of Medicine (US) Subcommittee on Interpretation and Uses of Dietary Reference Intakes and Institute of Medicine (US) Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference Intakes. DRI Dietary Reference Intakes: Applications in Dietary Assessment. Washington, DC : National Academies Press (US), 2000. 306 p. ISBN: 0-309-50254-3.
17. Попова А.Ю., Тутьлян В.А., Никитюк Д.Б. О новых (2021) Нормах физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации // *Вопросы питания.* 2021. Т. 90, № 4. С. 6–19. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-4-6-19>
18. Allen L., de Benoist B., Dary O., Hurrell R.; World Health Organization, Food and Agricultural Organization of the United Nations. Guidelines on Food Fortification with Micronutrients. Switzerland, Geneva : WHO Press, 2006. ISBN: 92-4-159401-2.
19. Bruins M.J., Mugambi G., Verkaik-Kloosterman J., Hoekstra J., Kraemer K., Osendarp S. et al. Addressing the risk of inadequate and excessive micronutrient intakes: traditional versus new approaches to setting adequate and safe micronutrient levels in foods // *Food Nutr. Res.* 2015. Vol. 59. Article ID 26020. DOI: <https://doi.org/10.3402/fnr.v58.26020>
20. Dietary Reference Intakes: A Risk Assessment Model for Establishing Upper Intake Levels for Nutrients. Food and Nutrition Board, Institute of Medicine. Washington, DC : National Academy Press, 1998. 82 p. ISBN: 0-309-57080-8.
21. Renwick A.G., Flynn A., Fletcher R.J., Muller D.J., Tuijelaars S., Verhagen H. Risk-benefit analysis of micronutrients // *Food Chem. Toxicol.* 2004. Vol. 42, N 12. P. 1903–1922. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2004.07.013>
22. Krul L., Kremer B.H.A., Luijckx N.B.L., Leeman W.R. Quantifiable risk – benefit assessment of micronutrients: from theory to practice // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2017. Vol. 57, N 17. P. 3729–3746. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1162765>
23. Joint FAO/WHO Technical Workshop on Food Nutrient Risk Assessment, World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations & International Programme on Chemical Safety. A model for establishing upper levels of intake for nutrients and related substances: report of a Joint FAO/WHO Technical Workshop on Food Nutrient Risk Assessment, WHO Headquarters. Geneva, Switzerland : World Health Organization, 2–6 May 2005. 241 p. ISBN: 9241594187, 9789241594189. URL: <https://iris.who.int/handle/10665/43451> URL: <http://www.who.int/ipcs/methods/en/>
24. EVM (The Expert Group on Vitamins and Minerals). Safe upper levels for vitamins and minerals. 2003. ISBN: 1-904026-11-7. URL: <https://cot.food.gov.uk/sites/default/files/vitmin2003.pdf>
25. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens); Turck D., Bohn T., Cámara M., Castenmiller J., de Henaau S. et al. Guidance for establishing and applying tolerable upper intake levels for vitamins and essential minerals // *EFSA J.* 2024. Vol. 22, N 11. Article ID e9052. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.9052>
26. EFSA (European Food Safety Authority). Guidance of risk-benefit assessment of foods // *EFSA J.* 2024. Vol. 22, N 7. Article ID e8875. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.8875>
27. EFSA (European Food Safety Authority), 2022. Workshop on data and methodologies for establishing tolerable upper intake levels for vitamins and minerals // *EFSA J.* 2022. Vol. 19, N 1. Article ID e6972. DOI: <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2022.EN-6972>
28. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens), 2024c. Scientific opinion on the tolerable upper intake level for preformed vitamin A and β -carotene // *EFSA J.* 2024. Vol. 22, N 6. Article ID e8814. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.8814>
29. EFSA. Tolerable upper intake levels for vitamins and minerals, scientific committee on food and scientific panel on dietetic products, nutrition and allergies. 2006. ISBN: 9291990140; URL: <http://www.efsa.europa.eu/en/ndatopics/docs/ndatolerableuil.pdf>
30. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens). Scientific opinion on the tolerable upper intake level for vitamin B6 // *EFSA J.* 2023. Vol. 21, N 5. Article ID e08006. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.8006>
31. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens). Scientific opinion on the tolerable upper intake level for vitamin D, including the derivation of a conversion factor for calcidiol monohydrate // *EFSA J.* 2023. Vol. 21, N 8. Article ID e08145. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.8145>
32. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens). Scientific opinion on the tolerable upper intake level for vitamin E // *EFSA J.* 2024. Vol. 22, N 8. Article ID 8953. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.8953>
33. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens). Scientific opinion on the tolerable upper intake level for folate // *EFSA J.* 2023. Vol. 21, N 11. Article ID e8353. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.8353>
34. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition, and Allergies (NDA). Scientific opinion on the tolerable upper intake level of calcium // *EFSA J.* 2012. Vol. 10, N 7. Article ID 2814. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2814>
35. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens). Scientific opinion on the tolerable upper intake level for selenium // *EFSA J.* 2023. Vol. 21, N 1. Article ID e07704. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.7704>
36. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens). Scientific opinion on the tolerable upper intake level for manganese // *EFSA J.* 2023. Vol. 21, N 12. Article ID e8413. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.8413>
37. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens). Scientific opinion on the tolerable upper intake level for iron // *EFSA J.* 2024. Vol. 22, N 6. Article ID e8819. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.8819>
38. Institute of Medicine (US) Panel on Micronutrients. Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc. Washington, DC : National Academies Press (US), 2001. ISBN-10: 0-309-07279-4, ISBN-10: 0-309-07290-5.
39. Institute of Medicine (US) Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference Intakes and its Panel on Folate, Other B Vitamins, and Choline. Dietary Reference Intakes for Thiamin, Riboflavin, Niacin, Vitamin B6, Folate, Vitamin B12, Pantothenic Acid, Biotin, and Choline. Washington, DC : National Academies Press (US), 1998. ISBN-10: 0-309-06411-2, ISBN-13: 978-0-309-06411-8.
40. Institute of Medicine (US) Committee to Review Dietary Reference Intakes for Vitamin D and Calcium. Dietary Reference Intakes for Calcium and Vitamin D / eds A.C. Ross, C.L. Taylor, A.L. Yaktine, H.B. Del Valle. Washington, DC : National Academies Press (US), 2011. 1132 p. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK56070> DOI: <https://doi.org/10.17226/13050> ISBN Ebook: 0-309-16395-1.
41. Institute of Medicine (US) Panel on Dietary Antioxidants and Related Compounds. Dietary Reference Intakes for Vitamin C, Vitamin E, Selenium, and Carotenoids. Washington, DC : National Academies Press (US), 2000. ISBN-10: 0-309-06949-1, ISBN-10: 0-309-06935-1 DOI: <https://doi.org/10.17226/9810>
42. Institute of Medicine (US) Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference Intakes. Dietary Reference Intakes for Calcium, Phosphorus, Magnesium, Vitamin D, and Fluoride. Washington, DC : National Academies Press (US), 1997. ISBN-10: 0-309-06350-7 ISBN-10: 0-309-06403-1. DOI: <https://doi.org/10.17226/5776>
43. Yasmin F., Ali S.H., Naeem A., Savul S., Afridi M.S.I., Kamran N. et al. Current evidence and future perspectives of the best supplements for cardioprotection: have we reached the final chapter for vitamins? // *Rev. Cardiovasc. Med.* 2022. Vol. 23, N 11. P. 381. DOI: <https://doi.org/10.31083/j.rcm.2311381>
44. Saini R.K., Prasad P., Lokesh V., Shang X., Shin J., Keum Y.S., Lee J.H. Carotenoids: dietary sources, extraction, encapsulation, bio-availability, and health benefits – a review of recent advancements // *Antioxidants (Basel).* 2022. Vol. 11, N 4. P. 795. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox11040795>
45. Navarro-Valverde C., Caballero-Villarraso J., Mata-Granados J.M., Casado-Díaz A., Sosa-Henríquez M., Malouf-Sierra J. et al. High serum retinol as a relevant contributor to low bone mineral density in postmenopausal osteoporotic women // *Calcif. Tissue Int.* 2018. Vol. 102, N 6. P. 651–656. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00223-017-0379-8>
46. Lerner U.H. Vitamin A – discovery, metabolism, receptor signaling and effects on bone mass and fracture susceptibility // *Front. Endocrinol. (Lausanne).* 2024. Vol. 15. Article ID 1298851. DOI: <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1298851>

47. An P., Wan S., Luo Y., Luo J., Zhang X., Zhou S. et al. Micronutrient supplementation to reduce cardiovascular risk // *J. Am. Coll. Cardiol.* 2022. Vol. 80, N 24. P. 2269–2285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2022.09.048>
48. Liu L., Luo P., Wen P., Xu P. The role of magnesium in the pathogenesis of osteoporosis // *Front. Endocrinol. (Lausanne)*. 2024. Vol. 15. Article ID 1406248. DOI: <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1406248>
49. Tinawi M. Disorders of calcium metabolism: hypocalcemia and hypercalcemia // *Cureus*. 2021. Vol. 13, N 1. Article ID 12420. DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.12420>
50. Вильмс Е.А., Добровольская Е.В., Турчанинов Д.В., Быкова Е.А., Сохошко И.А. Обеспеченность взрослого населения Западной Сибири витамином D: данные популяционного исследования // *Вопросы питания*. 2019. Т. 88, № 4. С. 75–82. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10044>
51. Papadimitriou D.T. The big vitamin D mistake // *J. Prev. Med. Public Health*. 2017. Vol. 50, N 4. P. 278–281. DOI: <https://doi.org/10.3961/jpmph.16.111>
52. Maurya V.K., Shakya A., McClements D.J., Srinivasan R., Bashir K., Ramesh T. et al. Vitamin C fortification: need and recent trends in encapsulation technologies // *Front. Nutr.* 2023. Vol. 10. Article ID 1229243. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1229243>
53. Алфёрова В.И., Мустафина С.В., Рымар О.Д. Йодная обеспеченность в России и мире: что мы имеем на 2019 год? // *Клиническая и экспериментальная тиреоидология*. 2019. Т. 15, № 2. С. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.14341/ket10353>
54. Стуклов Н.И., Басиладзе И.Г., Кислый Н.Д. Основные проблемы дефицита железа в России, возможные варианты решений // *Акушерство и гинекология*. 2021. № 11. P. 237–244. DOI: <https://doi.org/10.18565/aig.2021.11.237-244>
55. Клейн С.В., Вековщина С.А. Приоритетные факторы риска питьевой воды систем централизованного питьевого водоснабжения, формирующие негативные тенденции в состоянии здоровья населения // *Анализ риска здоровью*. 2020. № 3. P. 49–60. DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.06>

References

1. Mensink G.B., Fletcher R., Gurinovic M., Huybrechts I., Lafay L., Serra-Majem L., et al. Mapping low intake of micronutrients across Europe. *Br J Nutr.* 2013; 110 (4): 755–73. DOI: <https://doi.org/10.1017/S000711451200565X>
2. Kodentsova V.M., Vrzhesinskaya O.A., Nikityuk D.B., Tutel'yan V.A. Vitamin status of adult population of the Russian Federation: 1987–2017. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2018; 87 (4): 62–8. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2018-10043> (in Russian)
3. Inui T., Hanley B., Tee E.S., Nishihira J., Tontisirin K., Van Dael P., et al. The role of micronutrients in ageing Asia: what can be implemented with the existing insights. *Nutrients*. 2021; 13 (7): 2222. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu13072222>
4. Kodentsova V.M., Zhilinskaya N.V., Salagay O.O., Tutel'yan V.A. Specialized vitamin-mineral supplements for persons in extreme conditions. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2022; 91 (6): 6–16. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-6-6-16> (in Russian)
5. Kodentsova V.M., Zhilinskaya N.V., Shpigel' B.I. Vitaminology: from molecular aspects to improving technology of vitamin status children and adults. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2020; 89 (4): 89–99. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10045> (in Russian)
6. Olson R., Gavin-Smith B., Ferraboschi C., Kraemer K. Food fortification: the advantages, disadvantages and lessons from sight and life programs. *Nutrients*. 2021; 13 (4): 1118. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu13041118>
7. Wu T., Liu G. J., Li P., Clar C. Iodised salt for preventing iodine deficiency disorders. *Cochrane Database Syst Rev.* 2002; 2002 (3): CD003204. DOI: <https://doi.org/10.1002/14651858.CD003204>
8. Itkonen S.T., Erkkola M., Lamberg-Allardt C.J.E. Vitamin D fortification of fluid milk products and their contribution to vitamin D intake and vitamin D status in observational studies – a review. *Nutrients*. 2018; 10 (8): 1054. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu10081054>
9. Kodentsova V.M., Vrzhesinskaya O.A. The analysis of domestic and international policy of food fortification with vitamins. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2016; 85 (2): 31–50. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2016-00021> (in Russian)
10. Fletcher R.J., Bell I.P., Lambert J.P. Public health aspects of food fortification: a question of balance. *Proc Nutr Soc.* 2004; 63 (4): 605–14. DOI: <https://doi.org/10.1079/pns2004391>
11. Datta M., Vitolins M.Z. Food Fortification and supplement use – are there health implications? *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2016; 56 (13): 2149–59. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.818527>
12. Zhilinskaya N.V., Gromovych P.S. Food fortification – a global trend in food industry. *Pischevaya promishlennost': nauka i tekhnologii [Food Industry: Science and Technology]*. 2019; 12 (3): 31–5. (in Russian)
13. Flynn A., Moreiras O., Stehle P., Fletcher R.J., Muller D.J., Rolland V. Vitamins and minerals: a model for safe addition to foods. *Eur J Nutr.* 2003; 42 (2): 11830. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00394-003-0391-9>
14. Kloosterman J., Fransen H.P., de Stoppelaar J., Verhagen H., Rompelberg C. Safe addition of vitamins and minerals to foods: setting maximum levels for fortification in The Netherlands. *Eur J Nutr.* 2007; 46 (4): 220–9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00394-007-0654-y>
15. Rasmussen S.E., Andersen N.L., Dragsted L.O., Larsen J.C. A safe strategy for addition of vitamins and minerals to foods. *Eur J Nutr.* 2006; 45 (3): 123–35. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00394-005-0580-9>
16. Institute of Medicine (US) Subcommittee on Interpretation and Uses of Dietary Reference Intakes and Institute of Medicine (US) Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference Intakes. *DRI Dietary Reference Intakes: Applications in Dietary Assessment*. Washington, DC: National Academies Press (US), 2000: 306 c. ISBN: 0-309-50254-3.
17. Popova A.Y., Tutel'yan V.A., Nikityuk D.V. On the new (2021) Norms of physiological requirements in energy and nutrients of various groups of the population of the Russian Federation. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2021; 90 (4): 6–19. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-4-6-19> (in Russian)
18. Allen L., de Benoist B., Dary O., Hurrell R.; World Health Organization, Food and Agricultural Organization of the United Nations. *Guidelines on Food Fortification with Micronutrients*. Switzerland, Geneva: WHO Press, 2006. ISBN: 92-4-159401-2.
19. Bruinis M.J., Mugambi G., Verkaik-Kloosterman J., Hoekstra J., Kraemer K., Osendarp S., et al. Addressing the risk of inadequate and excessive micronutrient intakes: traditional versus new approaches to setting adequate and safe micronutrient levels in foods. *Food Nutr. Res.* 2015; 59: 26020. DOI: <https://doi.org/10.3402/fnr.v58.26020>
20. *Dietary Reference Intakes: A Risk Assessment Model for Establishing Upper Intake Levels for Nutrients*. Food and Nutrition Board, Institute of Medicine. Washington, DC: National Academy Press, 1998: 82 p. ISBN: 0-309-57080-8.
21. Renwick A.G., Flynn A., Fletcher R.J., Muller D.J., Tuijtelars S., Verhagen H. Risk-benefit analysis of micronutrients. *Food Chem Toxicol.* 2004; 42 (12): 1903–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2004.07.013>
22. Krul L., Kremer B.H.A., Luijckx N.B.L., Leeman W.R. Quantifiable risk – benefit assessment of micronutrients: from theory to practice. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2017; 57 (17): 3729–46. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1162765>
23. Joint FAO/WHO Technical Workshop on Food Nutrient Risk Assessment, World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations & International Programme on Chemical Safety. A model for establishing upper levels of intake for nutrients and related substances: report of a Joint FAO/WHO Technical Workshop on Food Nutrient Risk Assessment, WHO Headquarters, Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2–6 May 2005: 241 p. ISBN: 9241594187, 9789241594189. URL: <https://iris.who.int/handle/10665/43451> URL: <http://www.who.int/ipcs/methods/en/EVM> (The Expert Group on Vitamins and Minerals). Safe upper levels for vitamins and minerals. 2003. ISBN: 1-904026-11-7. URL: <https://cot.food.gov.uk/sites/default/files/vitmin2003.pdf>
24. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens); Turck D., Bohn T., Cámara M., Castenmiller J., de Henauw S., et al. Guidance for establishing and applying tolerable upper intake levels for vitamins and essential minerals. *EFSA J.* 2024; 22 (11): e9052. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.9052>
25. EFSA (European Food Safety Authority). Guidance of risk-benefit assessment of foods. *EFSA J.* 2024; 22 (7): e8875. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.8875>
26. EFSA (European Food Safety Authority), 2022. Workshop on data and methodologies for establishing tolerable upper intake levels for vitamins and minerals. *EFSA J.* 2022; 19 (1): e6972. DOI: <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2022.EN-6972>
27. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens), 2024c. Scientific opinion on the tolerable upper intake level for preformed vitamin a and β-carotene. *EFSA J.* 2024; 22 (6): e8814. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.8814>
29. EFSA. Tolerable upper intake levels for vitamins and minerals, scientific committee on food and scientific panel on dietetic products, nutrition

- and allergies. 2006. ISBN: 9291990140; URL: <http://www.efsa.europa.eu/en/ndatopics/docs/ndatolerableuil.pdf>
30. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens). Scientific opinion on the tolerable upper intake level for vitamin B6. *EFSA J.* 2023; 21 (5): e08006. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.8006>
31. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens). Scientific opinion on the tolerable upper intake level for vitamin D, including the derivation of a conversion factor for calcidiol monohydrate. *EFSA J.* 2023; 21 (8): e08145. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.8145>
32. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens). Scientific opinion on the tolerable upper intake level for vitamin E. *EFSA J.* 2024; 22 (8): 8953. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.8953>
33. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens). Scientific opinion on the tolerable upper intake level for folate. *EFSA J.* 2023; 21 (11): e8353. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.8353>
34. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition, and Allergies (NDA). Scientific opinion on the tolerable upper intake level of calcium. *EFSA J.* 2012; 10 (7): 2814. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2814>
35. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens). Scientific opinion on the tolerable upper intake level for selenium. *EFSA J.* 2023; 21 (1): e07704. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.7704>
36. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens). Scientific opinion on the tolerable upper intake level for manganese. *EFSA J.* 2023; 21 (12): e8413. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.8413>
37. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens). Scientific opinion on the tolerable upper intake level for iron. *EFSA J.* 2024; 22 (6): e8819. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.8819>
38. Institute of Medicine (US) Panel on Micronutrients. Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc. Washington, DC: National Academies Press (US), 2001. ISBN-10: 0-309-07279-4, ISBN-10: 0-309-07290-5.
39. Institute of Medicine (US) Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference Intakes and its Panel on Folate, Other B Vitamins, and Choline. Dietary Reference Intakes for Thiamin, Riboflavin, Niacin, Vitamin B6, Folate, Vitamin B12, Pantothenic Acid, Biotin, and Choline. Washington, DC: National Academies Press (US), 1998. ISBN-10: 0-309-06411-2, ISBN-13: 978-0-309-06411-8.
40. Institute of Medicine (US) Committee to Review Dietary Reference Intakes for Vitamin D and Calcium. Dietary Reference Intakes for Calcium and Vitamin D. In: A.C. Ross, C.L. Taylor, A.L. Yaktine, H.B. Del Valle (eds). Washington, DC: National Academies Press (US), 2011: 1132 p. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK56070> DOI: <https://doi.org/10.17226/13050> ISBN Ebook: 0-309-16395-1.
41. Institute of Medicine (US) Panel on Dietary Antioxidants and Related Compounds. Dietary Reference Intakes for Vitamin C, Vitamin E, Selenium, and Carotenoids. Washington, DC: National Academies Press (US), 2000. ISBN-10: 0-309-06949-1, ISBN-10: 0-309-06935-1 DOI: <https://doi.org/10.17226/9810>
42. Institute of Medicine (US) Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference Intakes. Dietary Reference Intakes for Calcium, Phosphorus, Magnesium, Vitamin D, and Fluoride. Washington, DC: National Academies Press (US), 1997. ISBN-10: 0-309-06350-7 ISBN-10: 0-309-06403-1. DOI: <https://doi.org/10.17226/5776>
43. Yasmin F., Ali S.H., Naeem A., Savul S., Afridi M.S.I., Kamran N., et al. Current evidence and future perspectives of the best supplements for cardioprotection: have we reached the final chapter for vitamins? *Rev Cardiovasc Med.* 2022; 23 (11): 381. DOI: <https://doi.org/10.31083/j.rcm2311381>
44. Saini R.K., Prasad P., Lokesh V., Shang X., Shin J., Keum Y.S., Lee J.H. Carotenoids: dietary sources, extraction, encapsulation, bioavailability, and health benefits – a review of recent advancements. *Antioxidants (Basel).* 2022; 11 (4): 795. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox11040795>
45. Navarro-Valverde C., Caballero-Villarraso J., Mata-Granados J.M., Casado-Díaz A., Sosa-Henríquez M., Malouf-Sierra J., et al. High serum retinol as a relevant contributor to low bone mineral density in postmenopausal osteoporotic women. *Calcif Tissue Int.* 2018; 102 (6): 651–6. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00223-017-0379-8>
46. Lerner U.H. Vitamin A – discovery, metabolism, receptor signaling and effects on bone mass and fracture susceptibility. *Front Endocrinol (Lausanne).* 2024; 15: 1298851. DOI: <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1298851>
47. An P., Wan S., Luo Y., Luo J., Zhang X., Zhou S., et al. Micronutrient supplementation to reduce cardiovascular risk. *J Am Coll Cardiol.* 2022; 80 (24): 2269–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2022.09.048>
48. Liu L., Luo P., Wen P., Xu P. The role of magnesium in the pathogenesis of osteoporosis. *Front Endocrinol (Lausanne).* 2024; 15: 1406248. DOI: <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1406248>
49. Tinawi M. Disorders of calcium metabolism: hypocalcemia and hypercalcemia. *Cureus.* 2021; 13 (1): 12420. DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.12420>
50. Vil'ns E.A., Dobrovol'skaya E.V., Turchaninov D.V., Bykova E.A., Sokhoshko I.A. Provision of vitamin D in the adult population of Western Siberia: a population-based study. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition].* 2019; 88 (4): 75–82. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-1004> (in Russian)
51. Papadimitriou D.T. The big vitamin D mistake. *J Prev Med Public Health.* 2017; 50 (4): 278–81. DOI: <https://doi.org/10.3961/jpmph.16.111>
52. Maurya V.K., Shakya A., McClements D.J., Srinivasan R., Bashir K., Ramesh T., et al. Vitamin C fortification: need and recent trends in encapsulation technologies. *Front Nutr.* 2023; 10: 1229243. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1229243>
53. Alferova V.I., Mustafina S.V., Rymar O.D. Iodine status of the population in Russia and the world: what do we have for 2019? *Klinicheskaya i eksperimental'naya tireodologiya [Clinical and Experimental Thyrology].* 2019; 15 (2): 73–82. DOI: <https://doi.org/10.14341/ket10353> (in Russian)
54. Stuklov N.I., Basiladze I.G., Kisly N.D. Main problems of iron deficiency in Russia, possible solutions. *Akusherstvo i ginekologiya [Obstetrics and Gynecology].* 2021; (11): 237–44. DOI: <https://doi.org/10.18565/aig.2021.11.237-244>. (in Russian)
55. Kleyn S.V., Vekovshinina S.A. Priority risk factors related to drinking water from centralized water supply system that create negative trends in population health. *Analiz riska zdorov'yu [Health Risk Analysis].* 2020; (3): 49–60. DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.06> (in Russian)

Для корреспонденции

Людина Александр Юрьевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела экологической и медицинской физиологии ИФ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
 Адрес: 167982, Российская Федерация, г. Сыктывкар, ГСП-2, ул. Первомайская, 50
 Телефон: (904) 234-81-51
 E-mail: salu_06@inbox.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4849-4735>

Людина А.Ю., Бушманова Е.А., Логинова Т.П., Гарнов И.О., Бойко Е.Р.

Влияние различных соотношений жиров и углеводов в рационе лыжников-гонщиков на время выполнения теста «до отказа» и соревновательную результативность

Effects of different fat-to-carbohydrate ratio in cross-country skiers on time "until exhaustion" and competitive performance

Lyudinina A.Yu., Bushmanova E.A., Loginova T.P., Garnov I.O., Bojko E.R.

Институт физиологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», 167982, г. Сыктывкар, Российская Федерация

Institute of Physiology of the Komi Scientific Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 167982, Syktyvkar, Russian Federation

В практике спорта высших достижений изучение вклада макронутриентов в энергообеспечение физических нагрузок является одним из актуальных вопросов прогнозирования высокой результативности.

Целью работы был анализ показателей выносливости (абсолютное и относительное значение максимального потребления кислорода, общее время тестирования и баллы общего зачета рейтинга Федерации лыжных гонок России) у высококвалифицированных спортсменов в зависимости от разного уровня потребления углеводов (норма или ниже нормы) и жиров (норма или выше нормы) в рационе.

Финансирование. Работа выполнена за счет средств субсидии на выполнение государственного задания № ГР1021051201877-3-3.1.8 (2022–2026).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Концепция и дизайн исследования – Людина А.Ю.; сбор первичных данных – Логинова Т.П., Гарнов И.О., Бушманова Е.А.; анализ данных исследования, подготовка рукописи – Людина А.Ю., Бушманова Е.А.; редактирование – Бойко Е.Р.; утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи – все авторы.

Для цитирования: Людина А.Ю., Бушманова Е.А., Логинова Т.П., Гарнов И.О., Бойко Е.Р. Влияние различных соотношений жиров и углеводов в рационе лыжников-гонщиков на время выполнения теста «до отказа» и соревновательную результативность // Вопросы питания. 2025. Т. 94, № 6. С. 118–128. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-118-128>

Статья поступила в редакцию 23.06.2025. **Принята в печать** 10.11.2025.

Funding. The study was carried out at the expense of subsidies for the implementation of State Assignment No. GR1021051201877-3-3.1.8 (2022–2026).

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

Contribution. The concept and design of the study – Lyudinina A.Yu.; data collection – Garnov I.O., Loginova T.P., Bushmanova E.A.; data analysis, writing the manuscript – Lyudinina A.Yu., Bushmanova E.A.; editing – Bojko E.R.; approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article – all authors.

For citation: Lyudinina A.Yu., Bushmanova E.A., Loginova T.P., Garnov I.O., Bojko E.R. Effects of different fat-to-carbohydrate ratio in cross-country skiers on time "until exhaustion" and competitive performance. Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]. 2025; 94 (6): 118–28. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-118-128> (in Russian)

Received 23.06.2025. **Accepted** 10.11.2025

Материал и методы. В общеподготовительный период годового цикла проведено ретроспективное продольное исследование лыжников-гонщиков мужского пола ($n=46$, средний возраст $19,7 \pm 4,8$ года) – членов сборных команд Республики Коми и России. Оценку энергопотребления проводили методом 24-часового воспроизведения питания в течение 3 дней. Физическую работоспособность и энергозатраты спортсменов оценивали с помощью эргоспирометрической системы «Охусп-Про» в тесте «до отказа».

Результаты. Относительные значения энергопотребления лыжников-гонщиков в отдельные дни общеподготовительного периода были на нижней границе нормы ($46,8 \pm 11,8$ ккал/кг в сутки). Анализ питания большинства спортсменов показал неоптимальное соотношение углеводов (в среднем по выборке ниже нормы – 388 ± 121 г/сут) и жиров (в среднем по выборке выше нормы – 132 ± 40 г/сут) в рационе. Сопоставление уровня потребления углеводов и жиров с показателями выносливости спортсменов демонстрирует лидирующее участие углеводов в энергообеспечении высокообъемных субмаксимальных и максимальных нагрузок. Увеличение потребления углеводов (более 350 г/сут) повышает длительность времени нагрузочного тестирования «до отказа» на 13% ($p=0,004$), и, соответственно, уровень потребления углеводов может рассматриваться в качестве маркера прогнозирования спортивной результативности. Более высокие значения баллов в общем зачете рейтинга Федерации лыжных гонок России ассоциированы с общим временем тестирования ($p=0,53$; $p=0,008$), а также с избыточным потреблением жиров с рационом ($p=0,51$; $p=0,021$), свидетельствуя об участии жиров в энергообеспечении соревновательной результативности.

Заключение. Соотношение жиров и углеводов в структуре энергетической ценности рациона (37:49) обследуемых лыжников-гонщиков не соответствует нормам потребления и вкладу в энергообеспечение высокообъемных субмаксимальных нагрузок в общеподготовительный период, прогнозируя низкую соревновательную результативность. Оптимизация рациона питания может способствовать повышению функциональных резервов и физических качеств высококвалифицированных спортсменов.

Ключевые слова: углеводы; жиры; питание; лыжники-гонщики; RUS пункты; время теста «до отказа»; максимальное потребление кислорода

In elite sports, studying the role of macronutrients in providing energy during physical activity is a vital area of research for achieving high performance.

The aim of the present study was to analyze the correlation between performance indicators (VO_{2max} test time, and Russian Cross-Country Skiing Federation rating score) and the levels of carbohydrate (normal or below normal) and fat (normal or above normal) intake in elite athletes.

Material and methods. A retrospective longitudinal analysis of data from cross-country skiers ($n=46$, male, age 19.7 ± 4.8 years) collected during the preparation period from 2014 to 2017 was performed. Energy intake was evaluated using the 24-hour recall method for 3 days. Performance indicators and energy expenditure were measured by indirect calorimetry in a test to failure.

Results. Relative energy intake of the athletes on typical training days was at the lower limit (47 ± 12 kcal/kg day). Analysis of the actual diet showed a non-optimal ratio of carbohydrates (388 ± 121 g/day) and fats (132 ± 40 g/day) in the diet of the majority of the athletes. The association between carbohydrate and fat consumption levels with performance indicators demonstrated the leading contribution of carbohydrates to energy supply during submaximal and maximal physical performance. Adequate carbohydrate intake (more than 350 g/day) increased the duration of exercise testing time to failure by 13% ($p=0.004$) and, accordingly, the level of carbohydrate consumption can be considered as a marker for predicting athletic performance. The revealed direct correlation between high points in the Russian Cross-Country Skiing Federation rating and total testing time ($p=0.53$; $p=0.008$), as well as excess fat intake ($p=0.51$; $p=0.021$), indicate the participation of fats in the energy supply of competitive performance.

Conclusion. The ratio between fat and carbohydrate intake (37:49%) among the examined cross-country skiers does not meet recommended levels and is insufficient to cover their energy expenditure, which may be accompanied by a decrease in performance during the competition period. The results of this study can be applied to optimizing athletes' actual dietary intake and improving their physical qualities.

Keywords: carbohydrates; fats; diet; skiers; Russian Cross-Country Skiing Federation rating score; test time; maximum oxygen consumption

В спорте высших достижений и в лыжных гонках в частности высокая результативность обеспечивается высоким уровнем аэробного метаболизма [1, 2]. Известно, что лыжники-гонщики имеют самые высокие показатели максимального потребления кислорода (МПК), в связи с этим обследование спортсменов циклических видов спорта представляет интерес в качестве надежной модели для изучения выносливости. Высококвалифицированные лыжники-гонщики соревнуются в диапазоне дистанций продолжительностью примерно от 3 мин до 2 ч, в отличие от спортсменов других видов спорта, что предъявляет серьезные требования к их организму, особенно в согласовании анаэробной и окислительной систем [2, 3].

Как известно, к основным энергетическим субстратам в мышцах во время физической нагрузки (ФН) относятся углеводы и жирные кислоты, вклад которых в энергозатраты обусловлен в первую очередь интенсивностью и длительностью ФН [4–6]. Еще одним значимым фактором, влияющим на баланс энергетических субстратов во время ФН, является питание. В настоящее время факты повышения аэробной и физической работоспособности (ФР) спортсменов за счет углеводного звена не вызывают сомнений [6–8]. В то же время со стороны ученых, тренеров и спортсменов растет интерес к изучению механизмов метаболизма жиров при ФН [6, 9–12]. Поскольку жиры являются более энергоемкими, они помогают поддерживать оптимальный уровень доступности энергии во время аэробных и соревновательных нагрузок через увеличение общей энергетической ценности рациона [2]. При этом активное использование жиров в энергообеспечении высокоинтенсивных ФН позволяет элитным спортсменам более экономно расходовать мышечный гликоген и тем самым отодвигать момент его истощения, повышая продолжительность нагрузок и развивая аэробную работоспособность [9].

В лыжных гонках большинство соревнований и контрольных тренировок проводятся при интенсивности нагрузки максимальной мощности, их выполнение в основном сильно зависит от доступности углеводов в виде глюкозы крови и гликогена в мышцах [2, 8]. Недостаточное потребление углеводов на фоне сниженной энергетической ценности рациона в течение длительного времени может привести к развитию низкой дос-

тупности энергии и, как следствие, к потере спортивной формы, снижению соревновательной результативности и замедлению процессов построгогрузочного восстановления спортсменов [2, 8].

К наиболее важным показателям оценки ФР у лыжников-гонщиков относят потребление кислорода на пороге анаэробного обмена, МПК, мощность выполненной нагрузки [2], которые имеют высокую степень корреляции с результативностью в соревновательный период [8], а также являются валидными маркерами тестирования аэробной производительности [1, 13]. Кроме того, значимым предиктором выносливости является время работы «до отказа» [1]. Исследования по совместному изучению рациона питания с параметрами выносливости и соревновательной результативности среди высококвалифицированных лыжников-гонщиков единичны [8, 11].

В связи с этим **целью** работы был анализ показателей выносливости [абсолютное и относительное значение МПК, время тестирования и баллы общего зачета рейтинга Федерации лыжных гонок России (ФЛГР)] у высококвалифицированных спортсменов в зависимости от разного уровня потребления углеводов (норма или ниже нормы) и жиров (норма или выше нормы) в рационе.

Материал и методы

Дизайн исследования

В настоящем продольном ретроспективном исследовании спортсменов мужского пола, занимающихся циклическим видом спорта (лыжные гонки), проанализированы данные подготовительного периода тренировочного цикла (июнь, июль), собранные с 2014 по 2017 г. Все спортсмены были действующими членами сборной команды Республики Коми по лыжным гонкам, часть из них входила в сборную команду России. Спортивная квалификация спортсменов – мастера спорта (39,1%), кандидаты в мастера спорта (39,1%) и перворазрядники (21,8%).

Исходная выборка спортсменов ($n=46$) была поделена на 2 пары групп в соответствии с рекомендациями Международного общества спортивного питания [14, 15] по потреблению макронутриентов (углеводов и жиров) – ключевых энергетических субстратов (рис. 1). Разделение по спортивной квалификации и возрасту в группах было равнозначным.

При анализе жирового рациона были выделены лица с различным уровнем потребления жиров: 2-я группа ($n=22$) – спортсмены, в рационе которых абсолютное содержание жиров соответствовало норме, и 3-я группа ($n=24$) – спортсмены, у которых абсолютное потребление жиров с рационом существенно превышало норму (более 130 г/сут). Средняя калорийность рациона и потребление белков и углеводов у атлетов 3-й группы было значимо выше, чем у спортсменов 2-й группы.

При оценке углеводного компонента рациона ко второй паре групп исследования были отнесены спортсмены с разным уровнем потребления углеводов:

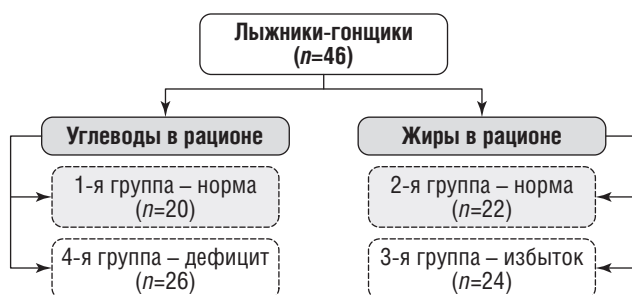


Рис. 1. Дизайн исследования

Fig. 1. Design of study

1-я группа ($n=20$) – спортсмены, в рационе которых абсолютное содержание углеводов соответствовало норме, и 4-я группа ($n=26$) – спортсмены, у которых абсолютное потребление углеводов было ниже нормы (менее 350 г/сут). При этом средняя калорийность рациона и потребление белков и жиров у атлетов 1-й группы были значительно выше, чем в 4-й группе.

Критериями допуска к исследованию являлись возраст (от 16 до 30 лет), отсутствие вредных привычек, признаков острой респираторной вирусной инфекции и хронических заболеваний на момент обследования. Все лыжники-гонщики находились под руководством тренера и следовали спортивным режимам тренировок, характерным для их вида спорта. Протоколы исследования (от 13.11.2013 и 28.12.2022) рассмотрены и одобрены локальным комитетом по биоэтике Института физиологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар). Все обследованные дали информированное согласие на участие в исследовании, которое было проведено в соответствии с этическими стандартами Хельсинкской декларации [16].

Оценка фактического питания

Обследуемые лыжники-гонщики имели централизованное стандартизированное 3-разовое питание на базе Центра спортивной подготовки сборных команд. Расчет пищевой и энергетической ценности индивидуальных рационов питания или оценку энергопотребления (ЭП) проводили методом 24-часового воспроизведения питания с применением оригинальной специально разработанной компьютерной программы (версия 1.1.0.328, IPhys., 2014, Россия) «Спорт: расчет и анализ рациона» (ГР № 2014619853 от 23.09.2014) [13].

Спортсменам были предоставлены подробные инструкции и стандартизированные формы для самостоятельной регистрации потребляемых продуктов и размеров порций. Инструкции предписывали указывать максимально детализированную информацию, включая торговые марки, способы приготовления и точное количество потребляемой пищи. Для повышения валидности данных заполненные пищевые дневники были тщательно проанализированы и перепроверены нутрициологом с многолетним стажем. Участники вели учет всего потребленного в течение 3 дней (1 выходной и 2 рабочих) в общеподготовительный период, который характеризуется высокообъемными нагрузками умеренной интенсивности.

Нормативные значения по потреблению макронутриентов и энергетической ценности рациона для спортсменов представлены из источников [14, 15] с учетом уровня физической активности, соответствующей общеподготовительному периоду тренировочного цикла.

Велозергметрическое тестирование проводили в первой половине дня и после стандартизированного высокоуглеводного завтрака калорийностью не более 300 ккал [17]. Калорийность завтрака по массе тела не нормализовалась. Участникам накануне исследования было рекомендовано снизить нагрузки высокой интенсивности во избежание истощения депо гликогена

в мышцах и печени, исключить поздний ужин, а также воздержаться от кофеина, поскольку для полного восстановления концентрации гликогена в мышцах необходимы как минимум 24 ч отдыха [2, 8].

Участники выполнили тест со ступенчато увеличивающейся нагрузкой на велозергометре (Ergoselect-100, Ergoline GmbH, Германия), как было описано ранее [13], для определения частоты сердечных сокращений, дыхательного коэффициента, МПК с помощью эргоспирометрической системы Охусон Pro (Jaeger, Германия). Оценку вклада основных энергетических субстратов в энерготраты проводили методом непрямой калориметрии. Процедура тестирования включала этапы: покой сидя (2 мин), педалирование без нагрузки (1 мин) и затем ступенчато увеличивающаяся нагрузка (начиная со 120 Вт с шагом 40 Вт каждые 2 мин). Скорость педалирования поддерживалась на уровне 60 об/мин. Критериями достижения МПК являлись прекращение прироста показателей потребляемого кислорода, резкое увеличение легочной вентиляции и дыхательного коэффициента. Переход в анаэробную зону регистрировался по значению дыхательного коэффициента выше 1,02.

Для оценки результативности выступлений на соревнованиях были использованы очки рейтинга общего зачета соревнований (совместный расчет по дистанционным гонкам и спринтам) на сайте ФЛГР за 2014–2015 и 2017–2018 гг. (<https://flgr-results.ru/ratings>). Были отобраны спортсмены мужского пола всех возрастных категорий (юноши 16–18 лет, юниоры 19–23 года и мужчины 24–30 лет).

Статистические методы исследования

Данные обработаны в программе Statistica (версия 12.6, StatSoftInc, 2015). Результаты представлены в виде $M \pm \sigma$. Значимость различий между показателями оценивали с помощью непараметрического критерия Манна–Уитни. Корреляционный анализ проводили с расчетом коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты

Антропометрические и физиологические показатели обследованных спортсменов находились в рамках референсных значений (табл. 1).

Обследованные нами лыжники-гонщики отличались от элитных спортсменов Норвегии [2] меньшими антропометрическими характеристиками и показателями ФР, что, вероятно, можно объяснить различием в методических подходах подготовки спортсменов и особенностями пищевого статуса.

Энергетическая ценность и содержание основных макронутриентов в рационе

Энергетическая ценность индивидуальных рационов питания у обследуемых спортсменов в абсолютных величинах составила 3223 ± 877 (от 2540 ± 667 до

Таблица 1. Антропометрические и физиологические показатели обследуемых лыжников-гонщиков в общеподготовительный период**Table 1.** Anthropometric and physiological indicators of the cross-country skiers during the preparation period

Показатель / Parameter	M±σ (n=46)
Возраст, годы / Age, years	19,7±4,8
Рост, см / Height, cm	175,8±5,8
Масса тела, кг / Body Weight, kg	68,8±5,3
Индекс массы тела, кг/м ² / Body mass index (BMI), kg/m ²	22,3±1,3
Доля жировой массы, % / Body fat percentage, %	11,1±3,3
Максимальное потребление кислорода, л/мин / Maximal oxygen uptake, L/min	4,2±0,4
Максимальное потребление кислорода на 1 кг массы тела, мл/мин на 1 кг / Maximal oxygen uptake per 1 kg body weight, mL/min 1 kg	61,4±5,4
ЧСС _{max} в минуту / HR _{max} , bpm	181,1±11,5
Время теста, мин / Test duration, min	11,6±2,0
Общий зачет рейтинга ФЛГР, баллы / RCSF rating, score	141,8±141,5

Примечание. ЧСС – частота сердечных сокращений; ФЛГР – Федерация лыжных гонок России.

Note. HR – heart rate; RCSF – Russian Cross-Country Skiing Federation.

3859±576) ккал, что почти на 30% ниже рекомендуемых значений для лиц, испытывающих интенсивные ФН [14, 15, 18]. Относительные значения ЭП спортсменов составили в среднем 46,8±11,8 ккал/кг в сутки, соответствующая нижней границе нормы [14, 15] (табл. 2).

Потребление углеводов в общей выборке спортсменов составило 388±121 г/сут (5,6±1,7 г/кг в сутки), и только у 25% спортсменов абсолютное значение этого показателя было в пределах рекомендуемых величин (см. табл. 2). Общее потребление жиров у 78% лыжников, напротив, было выше в 1,4 раза относительно норм (при размерах потребления от 55,0 до 209,0 г/сут). Вклад белков, жиров и углеводов в структуру энергетической ценности рациона составил 14:37:49, что не

соответствует рекомендуемым нормам потребления [14, 15] для спортсменов, особенно циклических видов спорта, у которых вклад углеводов в калорийность должен быть не менее 60%.

Следует отметить, что во всех исследуемых группах относительное потребление белка было в пределах рекомендуемых величин [14, 15]. Корреляционный анализ не выявил связи между относительным потреблением белка и временем тестирования ($p=0,28$; $p=0,06$), относительной величиной МПК ($p=0,16$; $p=0,27$) и баллами общего зачета рейтинга ФЛГР ($p=0,05$; $p=0,83$), в связи с чем мы рассматриваем возможность нивелировать степень вовлечения белков в энергообеспечение высокой ФР.

Таблица 2. Оценка фактического питания высококвалифицированных лыжников-гонщиков разных групп потребления макронутриентов в общеподготовительный период ($M\pm\sigma$)**Table 2.** Assessment of the actual dietary intake in highly trained cross-country skiers across training period ($M\pm\sigma$)

Показатель энергопотребления Energy intake indicator	Группы исследования / Study groups				Норма / Norm [14, 15]
	2 (n=22)	3 (n=24)	1 (n=20)	4 (n=26)	
Энергетическая ценность, ккал/сут Energy intake, kcal/day	2530±567	3859±576*	3748±623	2540±667*	4500–5000
Энергетическая ценность, ккал/кг массы тела в сутки Energy intake, kcal/kg of body weight per day	38,1±9,8	54,8±7,0*	53,9±7,6	37,5±9,8*	45–80
Белок, г/сут / Proteins, g/day	86,2±25,2	132,4±32,6*	124,9±29,6	91,4±38,1*	140–160
Белок, г/кг массы тела в сутки Proteins, g/kg of body weight per day	1,3±0,4	1,9±0,4*	1,7±0,4	1,3±0,5*	1,4–1,6
Белок, % / Proteins, %	14				14–15
Жиры, г/сут / Fats, g/day	98,1±24,7	163,7±21,8*	149,7±27,9	109,7±43,3*	90–120
Жиры, г/кг массы тела в сутки Fats, g/kg of body weight per day	1,5±0,4	2,3±0,3*	2,2±0,4	1,6±0,6*	1,0–2,0
Жиры, % / Fats, %	37				25
Углеводы, г/сут / Carbohydrates, g/day	316,6±83,0	452,7±114,2*	466,2±98,3	285,4±49,0*	450–700
Углеводы, г/кг массы тела в сутки Carbohydrates, g/kg of body weight per day	4,8±1,4	6,4±1,5*	6,7±1,3	4,2±0,8*	5–10
Углеводы, % / Carbohydrates, %	49				60–61

Примечание. * – установлены статистически значимые ($p<0,01$) различия между парами групп согласно U-критерию Манна-Уитни. Норма – рекомендации по потреблению макронутриентов и энергетической ценности рациона для спортсменов [14, 15].

Note. * – statistically significant differences were found between pairs of groups ($p<0,00$, Mann–Whitney U-test). Norm – recommendations for macronutrient intake and energy value of the diet for athletes [14; 15].

Анализ показателей выносливости в тесте «до отказа» у высококвалифицированных лыжников-гонщиков в зависимости от разного уровня потребления углеводов и жиров в рационе

Анализ показателей выносливости, таких как абсолютное и относительное значение МПК, время тестирования и баллы рейтинга ФЛГР, выявил значимые различия по ряду параметров у атлетов из групп.

При избыточном потреблении жиров (2-я группа) время тестирования «до отказа» лыжников было несколько выше ($12,2 \pm 2,0$ мин) по сравнению с таковым у спортсменов 1-й группы ($10,9 \pm 1,8$ мин, $p=0,063$), рацион которых был более сбалансирован. Аналогичная закономерность отмечена и для показателя результативности спортсменов – баллов рейтинга ФЛГР ($171,0 \pm 159,0$ и $96,6 \pm 89,9$ балла у атлетов в 3-й и 1-й группах соответственно, $p=0,043$). Абсолютное и относительное значение показателя МПК в 1-й и 3-й группах значимо не различалось ($p=0,286$).

В то же время показано, что при недостаточном потреблении углеводов лыжниками-гонщиками (4-я группа) время общего тестирования «до отказа» ($10,6 \pm 1,9$ мин) было значимо ниже по сравнению с таковым у спортсменов из 2-й группы ($12,3 \pm 1,8$ мин, $p=0,008$), у которых потребление углеводов было в норме (рис. 2, см. табл. 2).

Абсолютное и относительное значение показателя МПК у спортсменов 2 групп (2-й и 4-й) также значимо различалось в сторону увеличения (с $3,9 \pm 0,4$ до $4,4 \pm 0,4$ л/мин, $p=0,002$) при достаточном содержании углеводов в рационе питания. Показатель результативности спортсменов – баллы рейтинга ФЛГР ($161,5 \pm 167,4$ и $106,6 \pm 84,0$ балла) достоверно не различался в группах с разным уровнем углеводов в питании ($p=0,533$).

Интересно отметить индивидуальные показатели с крайними значениями потребления макронутриентов и результатами их тестирования и результативности. Так, у спортсмена с наиболее высоким потреблением жиров (209 г/кг в сутки, удельное потребление) и потреблением углеводов ниже нормы длительность теста «до отказа» составила 11,97 мин, при этом в соревновательный период он набрал 71 очко в общем рейтинге ФЛГР за сезон. В то же время лыжник-гонщик с наиболее низким потреблением углеводов (3,14 г/сут) и потреблением жиров в пределах нормы имел длительность теста «до отказа» 6,23 мин, при этом в соревновательный период он набрал 26 баллов в общем рейтинге ФЛГР за сезон.

Корреляционный анализ между показателями выносливости в тесте «до отказа» у высококвалифицированных лыжников-гонщиков и вкладом углеводов и жиров в рационе и энерготратах

Выявлены значимые корреляционные связи между общим временем теста «до отказа» и потреблением жиров ($p=0,339$, $p=0,021$), углеводов ($p=0,397$, $p=0,006$) с рационом. Установлена отрицательная корреляционная связь между длительностью теста «до отказа» и вкладом жиров в энерготраты покоя ($p=-0,428$,

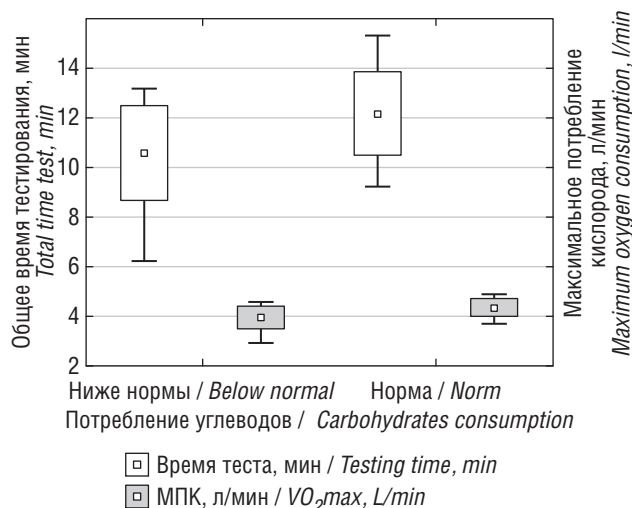


Рис. 2. Показатели выносливости [общее время тестирования и максимальное потребление кислорода (МПК)] в зависимости от разного уровня потребления углеводов с рационом лыжников-гонщиков

Fig. 2. Endurance indicator (total testing time and VO_{2max}) of cross-country skiers depending on the level of carbohydrates intake

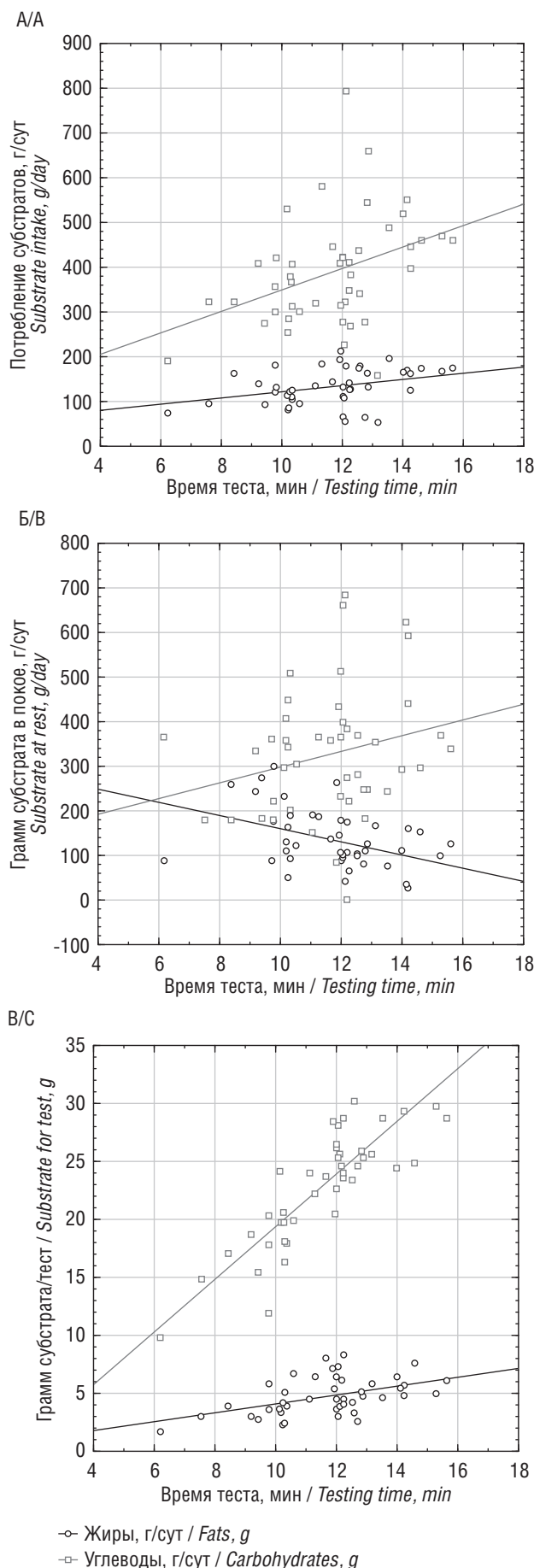
$p=0,003$) (рис. 3). Кроме того, установлена прямая сильная корреляционная связь между общим временем теста «до отказа» у спортсменов и количеством углеводов ($p=0,862$, $p=0,001$) и жиров ($p=0,474$, $p=0,000$), израсходованных за тест.

В целом по всей группе наблюдения (46 спортсменов) показана сильная прямая корреляционная связь между временем теста и абсолютными значениями МПК ($p=0,77$, $p=0,001$), а также баллами рейтинга ФЛГР ($p=0,53$, $p=0,008$). Найдена ассоциация между баллами рейтинга ФЛГР и количеством углеводов, потраченных за тест ($p=0,52$, $p=0,009$).

Обсуждение

В зависимости от уровня потребления углеводов и жиров с рационом питания у высококвалифицированных лыжников-гонщиков оценивали такие показатели ФР, как МПК, общее время тестирования и баллы рейтинга ФЛГР. Изучение фактического питания лыжников-гонщиков выявило недостаточность вклада потребляемых углеводов в общую энергетическую ценность суточных рационов. Так, вклад белков, жиров и углеводов в калорийность рациона спортсменов составил 14:37:49, не соответствуя рекомендуемым нормам потребления макронутриентов для атлетов, особенно циклических видов спорта.

Необходимость достаточного потребления углеводов спортсменами обусловлена связью низких концентраций гликогена в мышцах с нарушением высвобождения Ca^{2+} из скелетных мышц, способствующем утомлению [2, 7]. Было показано, что во время имитации 6-километровой скиатлонной гонки у элитных лыжников значения дыхательного коэффициента достигали



значений 0,98–1,02 [12], соответствуя 94–100% энергии, образуемой за счет окисления углеводов, что сопоставимо с результатами других исследований с проведением дистанционных гонок [2, 19]. Также сообщалось, что после 20-километровой классической гонки у элитных лыжников-гонщиков отмечалось снижение концентрации гликогена в мышцах рук и ног соответственно на 71 и 31% [19]. В то же время редкая частота приема углеводных напитков во время 30-километровой гонки приводит к отклонению от нормогликемии, снижению окисления липидов и усилению ощущений дискомфорта в желудочно-кишечном тракте [1].

Длительное пребывание в состоянии энергодифицита приводит к метаболическим изменениям, которые в долгосрочной перспективе могут нарушать адаптацию к тренировкам и спортивные результаты. В связи с этим адекватное норме (5–6 г на 1 кг массы тела в сутки) потребление углеводов необходимо для экономизации расхода гликогена в мышцах и предотвращения повышенной утомляемости лыжников-гонщиков даже в период умеренных тренировочных нагрузок [2, 15]. А поскольку примерно у 75% обследуемых нами спортсменов выявлено сниженное потребление углеводов на фоне дисбаланса доли жиров и углеводов в общей калорийности рациона, выдерживать рекомендуемое потребление углеводов особенно важно [18]. Для энергообеспечения соревновательных нагрузок высокой интенсивности и последующего восстановления лыжникам рекомендовано потребление углеводов около 7–12 г/кг в сутки [2, 8]. Прием углеводов в виде перекусов (1–4 г/кг в сутки за 1–4 ч до гонки) особенно важен для восстановления запасов гликогена в печени [8].

Подобная проблема питания спортсменов: избыток жировой и недостаточное количество углеводной пищи – достаточно часто встречается [2, 17, 18, 20]. Вклад жирового компонента в энергетическую структуру суточных рационов, в отличие от углеводного, может быть увеличен на 7–12% от рекомендуемых величин [13], или до 3,3 г/кг в сутки [21]. Схожая закономерность прослеживается и в данной работе: у 2/3 спортсменов показано превышение общего потребления жира на 30% относительно нормативных величин (минимум 20–25% от общей калорийности рациона) [2, 15]. В результате избыточного потребления жиров большинством обследованных спортсменов относительная величина энергетической ценности их рационов соответствовала рекомендуемым нормам. При этом, по данным М. Mountjoy и соавт. (2023), повышенное содержание жира в организме является адаптацией к низкой доступности энергии [22].

Рис. 3. Графики рассеивания, иллюстрирующие корреляции между временем тестирования и содержанием энергетических субстратов (углеводы и жиры) в рационе (А), их вкладом в энергозатраты покоя (Б) и энергозатратами в тесте «до отказа» (В)

Fig. 3. Scatter plots illustrating correlations between testing time and dietary energy substrates (carbohydrates and fats) intake (A); its contribution to resting energy expenditure (B) and energy expenditure during the test to failure (C)

Есть мнение, что рацион питания с высоким содержанием жиров в течение длительного периода увеличивает скорость окисления липидов в мышцах при ФН, причем этот эффект выражен дольше, чем срочная адаптация к повышенному потреблению углеводов [23]. В то же время показано, что избыточное потребление жиров (более 60% жиров в энергетической структуре изокалорийного рациона) в течение 1–4 нед снижает окисление энергетических субстратов и в целом ФР, несмотря на повышенную доступность гликогена [20, 23]. Соответственно, это может привести к снижению выносливости и повышать риск развития утомления по сравнению с использованием высокоуглеводных рационов, которые имеют явные преимущества в повышении ФР [20]. Таким образом, вопрос об избыточном потреблении жиров и их связи с выносливостью остается до конца не изученным. В целом адекватное норме потребление жиров является важным компонентом здорового рациона лыжника-гонщика, способствует повышению аэробной работоспособности [11], а также влияет на метаболизм жирорастворимых витаминов и иммунитет [8].

Спортсмены, тренирующие выносливость, нуждаются в повышенном потреблении белка (1,2–2,0 г/кг в сутки) по сравнению с нетренированными лицами [8, 15]. Показано, что низкоуглеводная диета сопровождается при аэробной ФН (60% МПК) более высоким расходом белка, оцениваемым по уровню мочевины, который может достигать ~10% [23]. Учитывая, что лыжники-гонщики не могут поддерживать высокую доступность углеводов в дни гонок, катаболизм белка во время гонок может превышать значения, описанные выше. Тем не менее удельные величины потребления белков у обследуемых нами спортсменов были в пределах или на нижней границе рекомендуемых значений.

Общее время тестирования включает работу в аэробном и анаэробном режиме, при этом углеводы вносят больший вклад именно в энергообеспечение анаэробной нагрузки. Выявленные нами корреляции между потреблением жиров и углеводов с рационом, а также их расходом в течение велоэргометрического тестирования и длительностью времени выполнения теста «до отказа», как одного из показателей высокой спортивной формы, могут свидетельствовать о необходимости достаточного потребления в первую очередь углеводов для обеспечения высокой ФР в целом (рис. 4).

Оценка относительного вклада основных энергетических субстратов в ЭП показала, что соотношение между жирами и углеводами в структуре рациона обследуемых нами лыжников-гонщиков составило 37 к 49%, тогда как для лиц, тренирующих выносливость, рекомендовано потребление углеводов в 2,4 раза больше, чем жиров, т.е. 25 к 75% [14, 15].

Спортсмен во время аэробной нагрузки получает относительно больше энергии за счет окисления жиров и, соответственно, меньше за счет окисления углеводов по сравнению с нетренированными лицами. Ранее было показано, что структуре энерготрат при ФН субмаксимальной мощности у лыжников-гонщиков, выполнивших

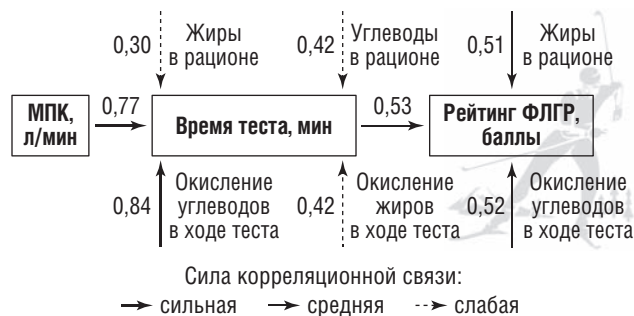


Рис. 4. Схема корреляционных связей между длительностью времени теста «до отказа» и показателями выносливости, а также основными энергетическими субстратами в рационе и их тратами за тест

МПК — максимальное потребления кислорода; ФЛГР — Федерация лыжных гонок России.

Fig. 4. The correlations between time of test “until exhaustion” with indicators performance and the main energy substrates in the diet and cost during test

тестирование «до отказа», в отличие от спортсменов, которые выполнили тестирование до порога анаэробного обмена, большая часть энергии в покое вырабатывается за счет жиров, а не углеводов [18]. О более высокой скорости окисления жиров у лыжников-гонщиков можно предположить исходя из недостаточного потребления углеводов в питании и более низкого содержания жира в их организме на фоне избыточного потребления жиров [13]. Показано, что у элитных спортсменов, тренирующихся на выносливость, хорошо выражен мышечный митохондриальный ретикулум, способствующий быстрому переключению между окислением липидов и углеводов в зависимости от потребности в энергии и доступности субстрата при ФН [6, 12], что позволяет экономичнее расходовать мышечный гликоген и тем самым отодвигать момент его истощения, а следовательно, повышать продолжительность выполнения нагрузки и развивать выносливость [6, 9, 24]. Таким образом, у более тренированных спортсменов в покое происходит экономизация углеводов на фоне активного использования жиров, что позволяет им выполнять больший объем интенсивной работы за счет углеводов, поступающих из гликогена мышц и печени.

При анализе результативности выступлений лыжников-гонщиков за весь предыдущий обследованию сезон нами не найдено связи между углеводами в рационе и баллами рейтинга ФЛГР ($p=0,22$, $p=0,342$), но выявлена прямая корреляция средней силы между очками рейтинга общего зачета рейтинга ФЛГР и жирами в рационе спортсменов ($p=0,51$, $p=0,021$). Можно предположить, что потребление углеводов в соревновательный период (когда рассчитывались показатели рейтинга соревнований) было несколько выше, чем в общеподготовительный период гоночного цикла, объясняя эту нестыковку данных.

В полученных нами материалах прослеживается определенная ассоциация результативности выступлений на

соревнованиях с углеводами, что выражено через положительную корреляцию между баллами рейтинга ФЛГР и количеством углеводов, потраченных за тест ($p=0,52$, $p=0,009$). Достаточное потребление углеводов с пищей, по-видимому, является предиктором способности окислять жир во время ФН [5, 25]. В недавнем исследовании финских лыжников-гонщиков показано, что более высокий показатель доступности энергии и потребление углеводов ($r=-0,65$, $p=0,002$), а также более низкие значения жировой массы ($r=0,60$, $p=0,006$) были связаны с более низкими (лучшими) баллами Международной федерация лыжного спорта (Federation Internationale de Ski, FIS), определяющиеся как средний показатель выступлений на международных соревнованиях. Низкое потребление углеводов является объективным предиктором низкой результативности на дистанции через FIS пункты ($R^2=0,46$, $p=0,004$) [9].

Заключение

В ходе исследования установлен дисбаланс рациона питания лыжников-гонщиков, проявляющийся незначительным дефицитом энергетической ценности рационов со сниженным потреблением углеводов ($5,6 \pm 1,7$ г/кг в сутки) и избыточным потреблением жиров ($1,9 \pm 0,5$ г/кг в сутки) относительно нормы более чем у 70% обследуемых. Сопоставление разного уровня потребления углеводов и жиров с рационом с показателями ФР (общее время тестирования, абсолютное и относитель-

ное значение МПК) и соревновательной результативности (баллы рейтинга общего зачета ФЛГР) указывает на важность их оптимального соотношения для энергообеспечения высокой ФР. Потребление углеводов в пределах нормы является предиктором общего времени тестирования ($p=0,008$) и прогнозирования результативности. Повышение жиров в рационе у большинства спортсменов ассоциировано с более высокими баллами рейтинга общего зачета ФЛГР ($p=0,51$, $p=0,021$), свидетельствуя о частичной компенсации углеводного и энергетического дефицита рационов за счет жирового компонента. Все вышеперечисленное актуализирует дальнейшее изучение степени участия основных макронутриентов в повышении ФР и соревновательной результативности лыжников-гонщиков. Результаты проведенного исследования могут быть применены для оптимизации рациона питания с целью повышения функциональных резервов и физических качеств спортсменов.

Ограничения исследования

Оценка ЭП – одна из самых трудоемких методик при работе с респондентами в исследованиях, часто сопровождаемая, при самостоятельной оценке ЭП спортсменами, определенной степенью занижения данных. Совместное изучение рациона питания и показателей физической работоспособности с биохимическими маркерами функционального состояния спортсменов, а также увеличение показателей соревновательной результативности, несомненно, повысило бы качество и новизну исследования.

Сведения об авторах

ИФ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар, Российская Федерация):

Люднина Александра Юрьевна (Aleksandra Yu. Lyudinina) – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела экологической и медицинской физиологии

E-mail: salu_06@inbox.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4849-4735>

Бушманова Екатерина Андреевна (Ekaterina A. Bushmanova) – младший научный сотрудник отдела экологической и медицинской физиологии

E-mail: katerinabushmanova@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1896-2879>

Логина Татьяна Петровна (Tatyana P. Loginova) – кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела экологической и медицинской физиологии

E-mail: log73@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7003-6664>

Гарнов Игорь Олегович (Igor O. Garnov) – кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела экологической и медицинской физиологии

E-mail: 566552@inbox.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2604-2773>

Бойко Евгений Рафаилович (Evgeny R. Boyko) – доктор медицинских наук, профессор, директор

E-mail: boiko60@inbox.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8027-898X>

Литература

1. McArdle W.D., Katch F.I., Katch V.L. Exercise Physiology: Nutrition, Energy, and Human Performance. 9th ed. Wolters Kluwer, 2023. 1110 p. ISBN: 1975159993.
2. Heikura I.A., Kettunen O., Garthe I., Holmlund H., Sandbakk S.B., Valtonen M. et al. Energetic demands and nutritional strategies of elite cross-country skiers during tour de ski. A narrative review // J. Sci. Sport

- Exerc. 2021. Vol. 3, N 3. P. 224–237. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42978-020-00105-x>
3. Losnegard T. Energy system contribution during competitive cross-country skiing // Eur. J. Appl. Physiol. 2019. Vol. 119, N 8. P. 1675–1690. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04158-x>
4. Molmen K.S., Almquist N.W., Skattebo O. Effects of exercise training on mitochondrial and capillary growth in human skeletal muscle: a systematic review and meta-regression // Sports Med. 2025. Vol. 55, N 1. P. 115–144. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40279-024-02120-2>
5. Gagnon D.D., Perrier L., Dorman S.C., Oddson B., Lariviere C., Serresse O. Ambient temperature influences metabolic substrate oxidation curves during running and cycling in healthy men // Eur. J. Sport Sci. 2020. Vol. 20, N 1. P. 90–99. DOI: <https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1612949>
6. Brun J.F., Myzia J., Varlet-Marie E., Raynaud de Mauverger E., Mercier J. Beyond the calorie paradigm: taking into account in practice the balance of fat and carbohydrate oxidation during exercise? // Nutrients. 2022. Vol. 14. Article ID 1605. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu14081605>
7. Ortenblad N., Nielsen J., Saltin B., Holmberg H.C. Role of glycogen availability in sarcoplasmic reticulum Ca²⁺ kinetics in human skeletal muscle // J. Physiol. 2011. Vol. 589, N 3. P. 711–725. DOI: <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.195982>
8. Kettunen O., Mikkonen R., Mursu J., Linnamo V., Ihalainen J.K. Carbohydrate intake in young female cross-country skiers is lower than recommended and affects competition performance // Front. Sports Act. Living. 2023. Vol. 5. Article ID 1196659. DOI: <https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1196659>
9. Andersson Hal U., Edin F., Pedersen A., Madsen K. Whole-body fat oxidation increases more by prior exercise than overnight fasting in elite endurance athletes // Appl. Physiol. Nutr. Metab. 2016. Vol. 41, N 4. P. 430–437. DOI: <https://doi.org/10.1139/apnm-2015-0452>
10. Chávez Guevara I.A., Amaro-Gahete F.J. Methodological issues related to maximal fat oxidation and FATmax reproducibility: a narrative review // Int. J. Obes. (Lond.). 2025. Vol. 49, N 10. P. 1984–1994. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41366-025-01861-y>
11. Lyudinina A.Y., Bushmanova E.A., Varlamova N.G., Bojko E.R. Dietary and plasma blood α -linolenic acid as modulators of fat oxidation and predictors of aerobic performance // J. Int. Soc. Sports Nutr. 2020. Vol. 17. Article ID 57. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12970-020-00385-2>
12. Romer T., Thunestvedt H.M., Frandsen J., Larsen S., Dela F., Wulff H.J. The relationship between peak fat oxidation and prolonged double-pole endurance exercise performance // Scand. J. Med. Sci. Sports. 2020. Vol. 30, N 11. P. 2044–2056. DOI: <https://doi.org/10.1111/sms.13769>
13. Физиолого-биохимические механизмы обеспечения спортивной деятельности зимних циклических видов спорта / под ред. Е.Р. Бойко. Сыктывкар: Коми республиканская типография, 2019. 256 с. ISBN: 978-5-7934-0813-4.
14. Kerkick C.M. Requirements of proteins, carbohydrates, and fats for athletes // Nutrition and Enhanced Sports Performance: Muscle Building, Endurance, and Strength. 2nd ed. Academic Press, 2019. P. 443–459. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813922-6.00038-2> ISBN: 9780128139226
15. Jagim A.R., Fields J.B., Magee M., Kerkick C., Luedke J., Erickson J. et al. The influence of sport nutrition knowledge on body composition and perceptions of dietary requirements in collegiate athletes // Nutrients. 2021. Vol. 13, N 7. Article ID 2239. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu13072239>
16. Harriss D.J., Macsween A., Atkinson G. Standards for ethics in sport and exercise science research: 2018 update // Int. J. Sports Med. 2017. Vol. 38, N 14. P. 1126–1131. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-0043-124001>
17. Бушманова Е.А., Логинова Т.П., Людина А.Ю. Влияние пищевого термогенеза низкокалорийной углеводной нагрузки на энерготраты покоя // Журнал медико-биологических исследований. 2023. Т. 11, № 2. С. 153–161. DOI: <https://doi.org/10.37482/2687-1491-2136>
18. Bushmanova E.A., Lyudinina A.Y., Bojko E.R. The prevalence of low energy availability in cross-country skiers during the annual cycle // Nutrients. 2024. Vol. 16. Article ID 2279. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu16142279>
19. Ortenblad N., Nielsen J., Boushel R., Soderlund K., Saltin B., Holmberg H.C. The muscle fiber profiles, mitochondrial content, and enzyme activities of the exceptionally well-trained arm and leg muscles of elite cross-country skiers // Front. Physiol. 2018. Vol. 9. Article ID 1031. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01031>
20. Kiens B., Helge W.J. Adaptation to a high fat diet // Nutrition in Sport / ed. R.M. Maughan. Blackwell Science, 2000. P. 192–202.
21. Heikura I.A., Quod M., Strobel N., Palfreeman R., Civil R., Burke L.M. Alternate-day low energy availability during spring classics in professional cyclists // Int. J. Sports Physiol. Perform. 2019. Vol. 14, N 9. P. 1233–1243. DOI: <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0842>
22. Mountjoy M., Ackerman K.E., Bailey D.M., Burke L.M., Constantini N., Hackney A.C. et al. 2023 International Olympic Committee's (IOC) consensus statement on Relative Energy Deficiency in Sport (REDs) // Br. J. Sports Med. 2023. Vol. 57, N 17. P. 1073–1097. DOI: <https://doi.org/10.1136/bjsports-2023-106994>
23. Burke L.M. Re-examining high-fat diets for sports performance: did we call the «nail in the coffin» too soon? // Sports Med. 2015. Vol. 45, suppl. 1. P. 33–49. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0393-9>
24. Jeukendrup A.E. Modulation of carbohydrate and fat utilization by diet, exercise and environment // Biochem. Soc. Trans. 2003. Vol. 31. P. 1270–1273. DOI: <https://doi.org/10.1042/bst0311270>
25. Fletcher G., Eves F.F., Glover E.I., Robinson S.L., Vernooij C.A., Thompson J.L. et al. Dietary intake is independently associated with the maximal capacity for fat oxidation during exercise // Am. J. Clin. Nutr. 2017. Vol. 105. P. 864–872. DOI: <https://doi.org/10.3945/ajcn.116.133520>

References

1. McArdle W.D., Katch F.I., Katch V.L. Exercise Physiology: Nutrition, Energy, and Human Performance. 9th ed. Wolters Kluwer, 2023: 1110 p. ISBN: 1975159993.
2. Heikura I.A., Kettunen O., Garthe I., Holmlund H., Sandbakk S.B., Valtonen M., et al. Energetic demands and nutritional strategies of elite cross-country skiers during tour de ski. A narrative review. J Sci Sport Exerc. 2021; 3 (3): 224–37. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42978-020-00105-x>
3. Losnegard T. Energy system contribution during competitive cross-country skiing. Eur J Appl Physiol. 2019; 119 (8): 1675–90. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04158-x>
4. Molmen K.S., Almquist N.W., Skattebo O. Effects of exercise training on mitochondrial and capillary growth in human skeletal muscle: a systematic review and meta-regression. Sports Med. 2025; 55 (1): 115–44. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40279-024-02120-2>
5. Gagnon D.D., Perrier L., Dorman S.C., Oddson B., Lariviere C., Serresse O. Ambient temperature influences metabolic substrate oxidation curves during running and cycling in healthy men. Eur J Sport Sci. 2020; 20 (1): 90–9. DOI: <https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1612949>
6. Brun J.F., Myzia J., Varlet-Marie E., Raynaud de Mauverger E., Mercier J. Beyond the calorie paradigm: taking into account in practice the balance of fat and carbohydrate oxidation during exercise? Nutrients. 2022; 14: 1605. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu14081605>
7. Ortenblad N., Nielsen J., Saltin B., Holmberg H.C. Role of glycogen availability in sarcoplasmic reticulum Ca²⁺ kinetics in human skeletal muscle. J Physiol. 2011; 589 (3): 711–25. DOI: <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.195982>
8. Kettunen O., Mikkonen R., Mursu J., Linnamo V., Ihalainen J.K. Carbohydrate intake in young female cross-country skiers is lower than recommended and affects competition performance. Front Sports Act Living. 2023; 5: 1196659. DOI: <https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1196659>
9. Andersson Hal U., Edin F., Pedersen A., Madsen K. Whole-body fat oxidation increases more by prior exercise than overnight fasting in elite endurance athletes. Appl Physiol Nutr Metab. 2016; 41 (4): 430–7. DOI: <https://doi.org/10.1139/apnm-2015-0452>
10. Chávez Guevara I.A., Amaro-Gahete F.J. Methodological issues related to maximal fat oxidation and FATmax reproducibility: a narrative review. Int J Obes (Lond). 2025; 49 (10): 1984–994. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41366-025-01861-y>
11. Lyudinina A.Y., Bushmanova E.A., Varlamova N.G., Bojko E.R. Dietary and plasma blood α -linolenic acid as modulators of fat oxidation and predictors of aerobic performance. J Int Soc Sports Nutr. 2020; 17: 57. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12970-020-00385-2>
12. Romer T., Thunestvedt H.M., Frandsen J., Larsen S., Dela F., Wulff H.J. The relationship between peak fat oxidation and prolonged double-pole endurance exercise performance. Scand J Med Sci Sports. 2020; 30 (11): 2044–56. DOI: <https://doi.org/10.1111/sms.13769>
13. Boyko E.R. (ed.). Physiological and biochemical mechanisms of ensuring sports activities of winter cyclic sports. Syktyvkar: Komi respublikanskaya topografiya, 2019: 256 p. ISBN: 978-5-7934-0813-4. (in Russian)
14. Kerkick C.M. Requirements of proteins, carbohydrates, and fats for athletes. In: Nutrition and Enhanced Sports Performance: Muscle Building, Endurance, and Strength. 2nd ed. Academic Press, 2019:

- 443–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813922-6.00038-2> ISBN: 9780128139226
15. Jagim A.R., Fields J.B., Magee M., Kerkick C., Luedke J., Erickson J., et al. The influence of sport nutrition knowledge on body composition and perceptions of dietary requirements in collegiate athletes. *Nutrients*. 2021; 13 (7): 2239. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu13072239>
16. Harriss D.J., Macsween A., Atkinson G. Standards for ethics in sport and exercise science research: 2018 update. *Int J Sports Med*. 2017; 38 (14): 1126–31. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-0043-124001>
17. Bushmanova E.A., Loginova T.P., Lyudinina A.Y. The effect of the thermic effect of food of a low-calorie carbohydrate load on resting energy expenditure. *Zhurnal mediko-biologicheskikh issledovaniy [Journal of Medical and Biological Research]*. 2023; 11 (2): 153–161. DOI: <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z136> (in Russian)
18. Bushmanova E.A., Lyudinina A.Y., Bojko E.R. The prevalence of low energy availability in cross-country skiers during the annual cycle. *Nutrients*. 2024; 16: 2279. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu16142279>
19. Ortenblad N., Nielsen J., Boushel R., Soderlund K., Saltin B., Holmberg H.C. The muscle fiber profiles, mitochondrial content, and enzyme activities of the exceptionally well-trained arm and leg muscles of elite cross-country skiers. *Front Physiol*. 2018; 9: 1031. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01031>
20. Kiens B., Helge W.J. Adaptation to a high fat diet. In: R.M. Maughan (ed.). *Nutrition in Sport*. Blackwell Science, 2000: 192–202.
21. Heikura I.A., Quod M., Strobel N., Palfreeman R., Civil R., Burke L.M. Alternate-day low energy availability during spring classics in professional cyclists. *Int J Sports Physiol Perform*. 2019; 14 (9): 1233–43. DOI: <https://doi.org/10.1123/ijspp.2018-0842>
22. Mountjoy M., Ackerman K.E., Bailey D.M., Burke L.M., Constantin N., Hackney A.C., et al. 2023 International Olympic Committee's (IOC) consensus statement on Relative Energy Deficiency in Sport (REDs). *Br J Sports Med*. 2023; 57 (17): 1073–97. DOI: <https://doi.org/10.1136/bjsports-2023-106994>
23. Burke L.M. Re-examining high-fat diets for sports performance: did we call the «nail in the coffin» too soon? *Sports Med*. 2015; 45 (suppl 1): 33–49. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0393-9>
24. Jeukendrup A.E. Modulation of carbohydrate and fat utilization by diet, exercise and environment. *Biochem Soc Trans*. 2003; 31: 1270–3. DOI: <https://doi.org/10.1042/bst0311270>
25. Fletcher G., Eves F.F., Glover E.I., Robinson S.L., Vernooij C.A., Thompson J.L., et al. Dietary intake is independently associated with the maximal capacity for fat oxidation during exercise. *Am J Clin Nutr*. 2017; 105: 864–72. DOI: <https://doi.org/10.3945/ajcn.116.133520>

Для корреспонденции

Кобелькова Ирина Витальевна – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории антропонутириологии и спортивного питания ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»

Адрес: 109240, Российская Федерация, г. Москва,

Устьинский проезд, д. 2/14

Телефон: (495) 968-53-90

E-mail: irinavit66@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1237-5147>

Кобелькова И.В., Вржесинская О.А., Тармаева И.Ю.

Анализ рынка специализированных продуктов для питания спортсменов детско-юношеского возраста

Analysis of the market of specialized foodstuffs for nutrition of athletes of child and youth age

Kobelkova I.V., Vrzhesinskaya O.A., Tarmayeva I.Yu.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, 109240, г. Москва, Российская Федерация

Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, 109240, Moscow, Russian Federation

Организация оптимального питания, включая применение специализированных пищевых продуктов (СПП) и биологически активных добавок (БАД) к пище, является неотъемлемой частью системы медицинского обеспечения подготовки спортивного резерва в Российской Федерации.

Цель работы – оценка существующего рынка СПП, предназначенных для использования в питании спортсменов детского возраста, анализ нормативных документов и перспективных компонентов для разработки рецептур новых СПП для питания юных спортсменов с учетом особых потребностей, связанных с ростом, развитием и спецификой спортивной деятельности.

Материал и методы. Поиск литературы осуществляли за 2000–2025 гг. по базам данных РИНЦ, PubMed, ResearchGate, Google Scholar, по ключевым словам: «специализированные пищевые продукты», «дети-спортсмены», «подростки-спортсмены», «питание», «биологически активные добавки к пище», «рынок спортивного питания», «specialized foodstuffs», «child athletes», «adolescent athletes», «nutrition», «food supplements», «sports nutrition market».

Результаты. Мировой рынок спортивного питания в 2024 г. составил 21,71 млрд долларов США, к 2032 г. планируется рост более чем в 2 раза. В то

Финансирование. Работа по подготовке рукописи проведена за счет средств государственной субсидии на выполнение поисковых научных исследований по теме № FGMF-2025-0017.

Конфликт интересов. Вржесинская О.А. является научным редактором и ответственным секретарем редакции журнала, остальные авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Вклад авторов. Концепция и дизайн исследования – Кобелькова И.В., Тармаева И.Ю.; поиск источников литературы, формирование таблиц, написание текста – Кобелькова И.В.; формирование таблиц, редактирование – Вржесинская О.А.; утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи – все авторы.

Для цитирования: Кобелькова И.В., Вржесинская О.А., Тармаева И.Ю. Анализ рынка специализированных продуктов для питания спортсменов детско-юношеского возраста // Вопросы питания. 2025. Т. 94, № 6. С. 129–150. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-129-150>
Статья поступила в редакцию 28.10.2025. Принята в печать 25.11.2025.

Funding. The research was carried out at the expense of the state subsidy for the implementation of exploratory scientific research (No. FGMF-2025-0017).
Conflict of interest. Vrzhesinskaya O.A. is a scientific editor and executive secretary of the journal's editorial board; the other authors declare no conflict of interest.

Contribution. The concept and design of the study – Kobelkova I.V., Tarmayeva I.Yu.; search for literature sources, formation of tables, writing of the text – Kobelkova I.V.; formation of tables, editing – Vrzhesinskaya O.A.; approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article – all authors.

For citation: Kobelkova I.V., Vrzhesinskaya O.A., Tarmayeva I.Yu. Analysis of the market of specialized foodstuffs for nutrition of athletes of child and youth age. Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]. 2025; 94 (6): 129–50. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-6-129-150> (in Russian)
Received 28.10.2025. **Accepted** 25.11.2025

же время иностранные производители не предусматривают отдельную нишу СПП для спортсменов детского возраста. В Российской Федерации разработаны, прошли процедуру государственной регистрации и введены в Формуляр ФМБА России для спортсменов олимпийского резерва единичные СПП и БАД для детей с 11 и 14 лет. Из-за отсутствия нормативной базы для СПП для спортсменов детского возраста в Российской Федерации при разработке нормативно-технической документации на такие продукты, включая рецептуры, учитывают требования Технических регламентов Таможенного союза (ЕАЭС) и Единых санитарно-эпидемиологических и гигиенических требований к продукции (товарам), подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю), предъявляемым к СПП для детского питания. Кроме потребностей в основных пищевых веществах, витаминах, макро- и микроэлементах, в МР 2.3.1.0253-21 определены адекватные уровни суточного потребления для нескольких минорных биологически активных веществ (БАВ) для детей в возрасте 7–18 лет: карнитина, холина, миоинозита, флавоноидов, что позволяет без дополнительных клинических исследований вводить эти БАВ в СПП для спортсменов данной возрастной группы. Основными перспективными компонентами для использования в рецептурах СПП для детей-спортсменов являются различные виды белка, углеводов, витамины, макро- и микроэлементы, минорные БАВ для выпуска в разнообразных формах: инстантные и готовые напитки, батончики, печенье, желе, капсулированные и таблетированные БАД и др.

Заключение. Для спортсменов детско-юношеского возраста питание должно учитывать не только обеспечение потребностей во время спортивной деятельности, но и поддержание процессов роста и развития, соответствовать особым, более высоким требованиям к показателям качества и безопасности. Рынок СПП для питания детей-спортсменов представлен единичными продуктами, что определяет широкие перспективы разработки и выпуска новых продуктов для медико-биологического обеспечения детско-юношеского спорта.

Ключевые слова: специализированные пищевые продукты; дети-спортсмены; подростки-спортсмены; питание; биологически активные добавки к пище; рынок спортивного питания

The organization of optimal nutrition, including the use of specialized foodstuffs (SF) and dietary supplements, is an integral part of the medical support system for sports reserve training in the Russian Federation.

The purpose of the research was to evaluate the existing market of SF intended for child athletes, analyze regulatory documents and promising components for the development of new SF formulations for young athletes, taking into account the special needs associated with growth, development and specifics of sports activities.

Material and methods. The literature search was performed for the period 2000–2025 using the databases of RSCI, PubMed, ResearchGate, Google Scholar, by keywords: «specialized foodstuffs», «child athletes», «adolescent athletes», «nutrition», «food supplements», «sports nutrition market».

Results. The global market for «sports nutrition» in 2024 amounted to 21.71 billion US dollars, and by 2032 growth is projected to more than double. At the same time, abroad there is no separate niche for SF intended for child athletes. In the Russian Federation, single SF and dietary supplements for children aged 11 and 14 have been developed, passed the state registration procedure and entered into the «FMBA Form» for athletes of the Olympic reserve. Due to the lack of a regulatory framework for nutritional supplements for child athletes in the Russian Federation, the requirements of the Technical Regulations of the Customs Union (EAEU) and the Unified Sanitary, Epidemiological, and Hygienic Requirements for Products (Goods) Subject to Sanitary and Epidemiological Supervision (Control), applicable to SF for baby food, should be taken into account when developing formulas. In the Russian Federation, in addition to the requirements for essential macronutrients, vitamins, minerals and trace elements, adequate levels of daily intake have been determined for several minor bioactive compounds (BAC) for children aged 7–18 years: carnitine, choline, myo-inositol, flavonoids. This allows these BAS to be introduced into SF for young athletes without additional clinical studies. The main promising components for use in SF formulations for child athletes are various types of protein, carbohydrates, as well as vitamins, minerals and trace elements, minor BAC, for release in various forms: instant drinks and ready-to-drink, bars, cookies, jelly, encapsulated and tablet dietary supplements, etc.

Conclusion. Nutrition for youth athletes must address not only the needs of athletes during sports activities but also support growth and development, meeting specific, higher quality and safety requirements. The SF market for child sports nutrition is represented by single products, which determines the broad prospects for the development and release of new products for the medical and biological support in youth sports.

Keywords: specialized foodstuffs; child athletes; adolescent athletes; nutrition; food supplements; sports nutrition; sports nutrition market

В Стратегии развития физической культуры и спорта в Российской Федерации на период до 2030 г. одними из важнейших задач являются совершенствование системы спортивной подготовки детей и молодежи, формирование условий для развития школьного и студенческого спорта, а также создание межотраслевой кластерной системы научно-методического и медико-биологического обеспечения спорта с развитием экспериментальной инновационной деятельности. В области медико-биологического обеспечения спортсменов питание играет одну из решающих ролей, оказывая влияние на параметры пищевого, иммунного и метаболического статуса, адаптационного потенциала при максимальной напряженности тренировочного и соревновательного процесса, поддержании гомеостезиса, осуществлении восстановительных процессов после окончания нагрузок [1, 2]. Спортсмены детско-юношеского возраста в силу незавершенных процессов роста и развития систем организма, включая детоксикационные, имеют особые потребности как в самих пищевых веществах, так и в более высоком уровне безопасности содержащих их продуктов. В то же время не всегда есть возможность потребления достаточного количества макро- и микронутриентов с традиционными продуктами, что обуславливает необходимость разработки специализированных пищевых продуктов (СПП) для оптимизации рациона в соответствии с энерготратами и текущими спортивными задачами, в частности со снижением жировой и с сохранением или повышением скелетно-мышечной массы тела.

Под сложившимся в иностранной литературе термином «эргогенные добавки» подразумевают СПП и биологически активные добавки к пище (БАД), содержащие пищевые вещества, предназначенные для улучшения спортивных результатов, ускорения восстановления мышечной массы, предотвращения травм за счет улучшения состояния опорно-двигательного аппарата [3, 4]. При введении в рацион СПП и БАД для улучшения спортивных результатов необходимо учесть множество факторов, а также снизить риск нарушения антидопинговых правил и ущерба здоровью из-за употребления загрязненных продуктов [5]. Смысл дополнительного введения тех или иных пищевых веществ появляется только при выявлении их дефицита в рационе. Для этого необходимо оценить состояние фактического потребления пищевых веществ и пищевой статус, сформировавшийся под действием рациона (фактического питания) и уровня физических нагрузок с учетом генетических особенностей организма [6].

Учитывая сложившуюся ситуацию с дополнительным обеспечением молодых спортсменов необходимыми пищевыми веществами в виде СПП и БАД, актуальной представляется работа по исследованию рынка СПП, анализу научных данных по оценке их эффективности

в детско-юношеском спорте, поиску нормативных документов для разработки инновационных отечественных СПП и разработке рекомендаций по их применению [7–9].

Цель работы – оценка существующего рынка СПП, предназначенных для питания спортсменов детского возраста, анализ нормативных документов и перспективных компонентов для разработки рецептур новых СПП для питания юных спортсменов с учетом особых потребностей, связанных с ростом, развитием и спецификой спортивной деятельности.

Материал и методы

Поиск литературы осуществляли по базам данных РИНЦ, Google Scholar, ResearchGate, PubMed с использованием ключевых слов: «специализированные пищевые продукты», «дети-спортсмены», «подростки-спортсмены», «питание», «биологически активные добавки к пище», «рынок спортивного питания», «specialized food-stuffs», «child athletes», «adolescent athletes», «nutrition», «food supplements», «sports nutrition market». Глубина поиска – 25 лет.

Анализ рынка спортивного питания

Под термином «спортивное питание» на территории стран ЕАЭС подразумевают «питание, предназначенное для обеспечения повышенной потребности спортсменов в энергии, пищевых и биологически активных веществах за счет полноценных рационов и включения в них СПП для питания спортсменов, с учетом спортивной специализации, фазы спортивного цикла (базовый подготовительный, предсоревновательный, соревновательный и восстановительный периоды), физического статуса, состояния адаптационного потенциала, возрастно-половых особенностей, состояния здоровья, индивидуальных пищевых предпочтений и индивидуальных особенностей здоровья и климатогеографических условий»¹. Таким образом, ключевым моментом в обеспечении физиологических потребностей спортсменов в первую очередь являются оптимальные рационы, а СПП и БАД являются важным дополнением к ним. В то же время в торговых предприятиях, в том числе в крупных розничных торговых сетях, мелких розничных пунктах продажи, аптечных и специализированных магазинах, фитнес-залах, интернет-магазинах, стойко утвердилось с приходом на внутренний рынок импортной продукции, а вместе с ней и рекламы понятие «спортивное питание», под которым реализуют СПП и БАД для питания спортсменов.

В число потребителей СПП для спортсменов входят не только спортсмены уровня олимпийского резерва, но и учащиеся спортивных школ, профессиональных

¹ Межгосударственный стандарт ГОСТ 34006-2016 Продукция пищевая специализированная. Продукция пищевая для питания спортсменов. Термины и определения.

Таблица 1. Основные аналитические отчеты по рынку специализированной пищевой продукции для спортсменов

Table 1. Main analytical reports on the market of specialized food products for athletes

Название отчета <i>Name of the report</i>	Компания, осуществляющая аналитическую деятельность <i>An analytical company</i>	Период и регион исследования <i>Study period and region</i>	Источник литературы <i>References</i>
Исследование рынка спортивного питания <i>Sports Nutrition Market Research</i>	ООО «Маркетинговое агентство МаксиОма» (РФ)	Россия 2014–2024 гг., прогноз на 2025–2028 гг.	[10]
Отчет об анализе размера, доли и тенденций мирового рынка спортивного питания <i>Report on the analysis of the size, share and trends of the global sports nutrition market</i>	DATA BRIDGE (США)	Мировой рынок 2022–2024 гг., прогноз до 2029 и 2032 гг.	[11]
Анализ рынка БАД в России – 2026. Показатели и прогнозы <i>Analysis of the dietary supplement market in Russia – 2026. Indicators and forecasts</i>	TEBIZ GROUP (ООО «Технологии бизнеса», РФ)	Россия, 2021–2025 гг., прогноз до 2035 г.	[12]
Анализ рынка спортивного питания в России <i>Analysis of the sports nutrition market in Russia</i>	BusinesStat	Россия, 2020–2024 гг., прогноз на 2025–2029 гг.	[13]
Анализ рынка спортивного питания в 2024 г. <i>Analysis of the sports nutrition market in 2024</i>	Агентство исследований промышленных и потреби- тельских рынков – АИПР	Россия, 2024 г., прогноз до 2030 г.	[14]
Анализ мирового рынка спортивного питания <i>Analysis of the global sports nutrition market</i>	Grand View Research	Мировой рынок, прогнозы роста на 2025–2030 гг.	[15]

и любительских спортивных клубов и организаций, в том числе неолимпийских видов спорта, а также лица, повышающие уровень физической активности на открытых для свободного доступа спортивных сооружениях и в фитнес-клубах.

Анализ рынка СПП и БАД для спортсменов проводится несколькими ведущими аналитическими компаниями, ежегодно выпускающими коммерческие отчеты (табл. 1).

Размер мирового рынка специализированной пищевой продукции для питания спортсменов в 2024 г. составил 21,71 млрд долларов США, а к 2032 г. планируется рост более чем в 2 раза, до 48,13 млрд долларов США [11]. Северная Америка доминирует на рынке спортивного питания благодаря расширению информации о веганской диете и рекламной кампании брендов в социальных сетях, при этом ожидается, что рынок в Азиатско-Тихоокеанском регионе будет увеличиваться в этот же период из-за расширяющейся урбанизации и роста доходов, увеличения расходов на разработку натуральных ингредиентов. Наибольшая доля производств СПП приходится на США, существенные сегменты рынка находятся в Канаде, Европе и Азии. Из европейских стран лидерами являются Великобритания, Германия, Швейцария и Испания. Стремительный рост производства СПП для спортсменов отмечен в Китае, Южной Корее и Японии.

В Российской Федерации в связи с торговыми санкциями в последние 2 года доля отечественных продуктов стала преобладать над импортными [10]. Следует отметить, что налажено отечественное производство концентратов сывороточных белков, являющихся наилучшими наряду с белками яйца компонентами высокобелковых СПП (так называемых протеинов). В ближайшей перспективе в целях обеспечения национальной безопасности предстоит импортозамещение витаминных субстанций путем восстановления их отечественного производства.

На мировом рынке СПП для питания спортсменов [11] доминируют США с такими крупнейшими брендами, как Universal Nutrition (высококачественные СПП для бодибилдинга и силовых видов спорта), Muscle Tech (научные разработки и инновационные формулы продуктов для питания спортсменов), Dymatize (высокоэффективные «протеиновые» смеси, аминокислотные и «предтренировочные» комплексы) [16]. Следует отметить, что Optimum Nutrition [широкая линейка высокобелковых смесей («протеинов»), гейнеров, БАД с креатином, витаминных комплексов] и BSN (Bio-Engineered Supplements and Nutrition – инновационные продукты для набора мышечной массы, повышения выносливости и улучшения спортивных результатов] выкупила ирландская компания Glanbia plc. Великобритания представлена на рынке производителем VP Lab, специализирующимся на разработке и реализации широкого спектра СПП для спортсменов [16]. Ведущая швейцарская фирма Sponser производит СПП и БАД для спортсменов высокой квалификации. Китайские компании, в частности TMall в провинции Чанхуань, выпускают отдельные компоненты СПП и БАД, реализуемые в другие страны для локализованных там производств. В табл. 2 представлены иностранные лидеры среди производителей СПП и БАД для спортсменов.

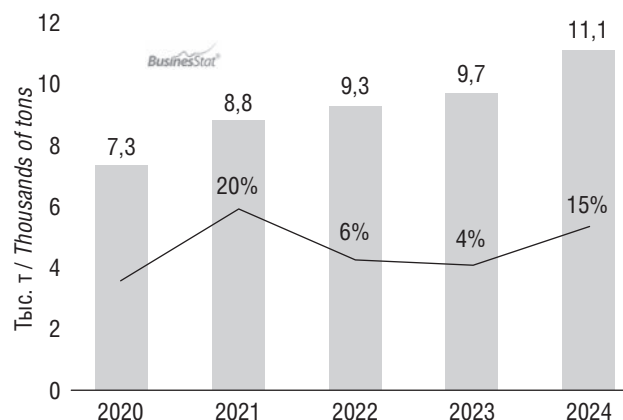
По данным «ЮMoney», с 1 января по 15 ноября 2023 г. по сравнению с аналогичным периодом прошлого года оборот платежей онлайн-магазинов БАД и «спортивного питания» в Российской Федерации вырос вдвое, число покупок увеличилось на 98%, а покупателей – на 43%. Средняя стоимость одной покупки тоже выросла на 7% и составила 6678 руб. Наибольшей популярностью пользуются ω-3 полиненасыщенные жирные кислоты, лецитин, витамины D, C, группы B, кальций, магний, цинк и железо. «Рост популярности БАД среди россиян – это следствие популярности здорового образа жизни. Пик употребления БАД приходится на весну и позд-

Таблица 2. Основные иностранные производители специализированной пищевой продукции для спортсменов**Table 2.** Main foreign manufacturers of sport nutrition

Страна / Country	Производитель / Manufacturer
США USA	CytoSport Inc., PepsiCo Inc.
	General Nutrition Centers (GNC) Holdings Inc.
	Herbalife Nutrition Inc.
	MusclePharm
	Nature's Bounty Co.
	Now Health Group, Inc.
	Nutiva Inc.
	Orgain Inc.
	Reliance Vitamin Company Inc.
	Simply Good Food Co.
	True Nutrition
Великобритания Great Britain	VP Lab
Германия, США Germany, USA	GTI GmbH (Maxler)
Германия Germany	SANOMED GESUNDHEITS- UND SPORTNAHRUNGSMITTELHERSTELLUNG
Ирландия Irish	Glanbia plc. (BSN, Optimum Nutrition и другие)
	Kerry Group Plc.
Канада Canada	Iovate Health Sciences International Inc.
КНР China	TMall
ОАЭ UAE	ULTRAMADE NUTRITION & BEVERAGES
Сан-Марино San Marino	AQUA VIVA
Франция France	Danone SA
Швейцария Switzerland	SPONSER SPORT FOOD AG
Япония Japan	TOPPAN PACKAGING SERVICE
	Ajinomoto Group Global

ную осень, когда организм человека перестраивается с одного сезона на другой»². По данным «Анализа рынка спортивного питания в России» [13], в 2024 г. продажи СПП и БАД для спортсменов в России увеличились на 15% и составили 11,1 тыс. тонн (см. рисунок).

Удобная форма СПП в виде «протеиновых» батончиков за счет компактного формата позволяет взять его с собой в качестве замены отдельных приемов пищи, что увеличивает этот сегмент рынка. Содержание белка в батончиках растет – если раньше оно составляло около 20%, то сейчас доходит до 30% [13]. По прогнозам экспертов, в 2025 г. этот сегмент вырастет на 5–7% и составит 40 млрд руб. Положительная динамика обусловлена активной господдержкой российских производителей³. Растет выпуск бутилированных СПП, в виде саше, жевательных таблеток и гелей. На рынке появля-



Динамика продаж специализированных пищевых продуктов и биологически активных добавок к пище, предназначенных для спортсменов, в Российской Федерации (2020–2024 гг.) [13]

Dynamics of sales of specialized foodstuffs and food supplements intended for athletes in the Russian Federation (2020–2024) [13]

ются витаминно-минеральные комплексы (ВМК); коллагенсодержащие продукты; мороженое, йогурты, пудинги и сыры с повышенным содержанием белка; энергетические напитки; замороженные коктейли.

В целом скорость и простота приготовления (в случае необходимости) СПП является важным преимуществом для потребителя: например, для употребления коктейля достаточно залить порошок водой и взболтать. В Российской Федерации локализовано более 100 производителей и 700 брендов СПП и БАД для спортсменов [10, 12–14]. Следует отметить, что российские производители этого сектора продукции в связи с санкциями занимают более половины отечественного рынка на сегодняшний день. Ключевые российские компании по продаже «спортивного питания» представлены в табл. 3.

Следует отметить, что существенную часть СПП и БАД для питания спортсменов выпускают под различными торговыми марками на одних и тех же контрактных производствах, не принадлежащих владельцам брендов. Контрактные производства расположены в разных регионах РФ: в Московской области ООО «АРТ Современные научные технологии» (ART-LAB), в Мурманске – ООО «Полярис»; в Краснодаре – ООО «Жива Продукт». Производство БАД в капсулированной, таблетированной формах и в виде саше осуществляется на ФП «Оболенское» в Московской области, ООО «Эвалар» в Сибири, ООО «Фофуд» в Санкт-Петербурге, ООО «ССП» в Смоленске и др. При этом на контрактных производствах используют готовые ингредиенты, закупаемые как у отечественных, так и зарубежных производителей. Одним из крупнейших в Российской Федерации производителей концентратов молочного и сывороточного белка, казеина и других сухих молочных компонентов высоко-

² Retail.ru: <https://www.retail.ru/news/v-rossii-vyros-spros-na-biodobavki-i-sportivnoe-pitanie/> (дата обращения 28.10.2025).

³ <https://varseas.com/articles/tpost/ip4ozh6du1-40-milliardov-na-muskulak-kak-rossiiskoe>

Таблица 3. Основные российские компании по продаже и производству специализированных пищевых продуктов и биологически активных добавок к пище, предназначенных для спортсменов

Table 3. The main Russian companies selling and producing dietary supplements for athletes

Федеральный округ <i>Federal District</i>	Продавец <i>Seller</i>	Бренд <i>Brand</i>	Собственное производство <i>Own production</i>
Приволжский <i>Volga</i>	ООО «Фитнес Фуд»	БОМББАР	Есть
	ООО «Арсенал Атлета»	NUTRAWAY, Daribar	
	ООО «Тенториум»	Тенториум	Есть
Северо-западный <i>North-Western</i>	ООО «Прайм-Крафт»	Prime Kraft	Есть
	ООО «R-Line»	R-Line	Есть
	Группа компаний Pure, ООО «Старк Индастрис»	Fuze, Pure, Pureprotein, FITNESS Кондитерская	Есть
Сибирский <i>Siberian</i>	ООО «Эвалар»	Эвалар	Есть
	ООО «Международная Компания "Сибирское Здоровье"»	Siberian Wellness, Cyber Build	Есть
	ООО «Лаборатория Современного Здоровья»	Siberian Wellness, Keforma	Есть
Центральный <i>Central</i>	ООО «АПТ Современные Научные Технологии»	IronMan	Есть
	ООО «В-МИН»	В-МИН, в большей мере является контрактным производством	Есть
	ООО «Академия-Т»	АКАДЕМИЯ-Т	Есть
	ООО «Геон»	GEON™	Есть
	ООО «ССП»	Только БАД	Есть

белковых СПП (так называемых протеинов) является АО «Молвест» в Воронежской области. Яичный белок, в том числе ферментированный, и сухой желток производит в Ленинградской области АО «Птицефабрика Роскар», в Тульской области – ООО «Лето Групп», в Липецкой области – ООО «Велес-Агро». Углеводные компоненты (мальтодекстрин, различные виды крахмалов) производят АО «Крахмалопродукты» в Орловской области, на «Крахмальном заводе Гулькевичском» – ООО «Рустарк» в Краснодарском крае, ООО «НД-техник» – в Ставропольском крае, ООО «Биполь» – в Республике Татарстан и на других предприятиях. Витаминно-минеральные премиксы, а также пищевые добавки, используемые в составе СПП и БАД, на 90% пока импортные.

Обзор более 700 брендов спортивного питания, присутствующих на российском рынке, показал, что ассортимент формируется за счет продуктов, ориентированных на взрослых спортсменов. Отечественная классификация СПП для спортсменов основана на их компонентном составе⁴, а иностранная (в скобках) – на заявлениях о действии продуктов:

- высокобелковые продукты: концентраты, изоляты, гидролизаты животных и растительных белков («протеины» – для наращивания мышечной массы, улучшения силовых показателей, повышения работоспособности и т.п.);
- углеводно-белковые смеси («гейнеры» – для восстановления энергии, повышения работоспособности и выносливости);

- БАД, содержащие аминокислоты [комплекс из 3 незаменимых аминокислот с разветвленной боковой цепью (branched-chain amino acids, BCAA), незаменимые – (эссенциальные) аминокислоты (essential amino acids, EAA), глутамин, таурин, аргинин и другие, – для наращивания мышечной массы, восстановления, повышения работоспособности и др.];
- изотонические напитки («изотоники» – для снижения дегидратации, восстановления работоспособности);
- БАД, содержащие ВМК или отдельные витамины и/или макро- и микроэлементы (Zinc monomethionine aspartate and Magnesium Aspartate с включением витамина В₆ – ZMA, В-комплексы, с витамином D и кальцием и др.);
- БАД с различными биологически активными веществами (БАВ) («эргогенной» направленности – креатин, бета-аланин, кофеин и другие – повышают работоспособность);
- по форме выпуска: инстантные напитки, батончики, энергетические гели, готовые к употреблению напитки (Ready-to-drink, RTD) и др.

Зарубежная классификация СПП и БАД основана не только на заявлениях о предполагаемом действии тех или иных компонентов, но и на удобстве хранения или употребления той или иной формы продукта. Иностранная классификация и раздел 2 в приказе ФМБА России от 19.12.2022 № 309 (табл. 4) во многом совпадают.

⁴ ГОСТ 34006-2016 Продукция пищевая специализированная. Продукция пищевая для питания спортсменов. Термины и определения.

Относительно новый продукт RTD-напитки – это один из стремительно расширяющих свою нишу высокобелковый готовый к употреблению СПП в виде напитка. RTD-напитки, содержащие белковые композиции животного происхождения, занимают самую большую долю рынка – 55%, RTD-напитки с растительными белками – 30%, остальные 15% содержат другие пищевые ингредиенты.

В структуре российского рынка доля высокобелковых продуктов отечественного и импортного производства составляет до 70% ассортимента, углеводно-электролитные инстантные и готовые напитки занимают около 10–12%, ВМК – не более 5–7%. Однако ВМК стоят на одном из первых мест по частоте потребления спортсменами высокой квалификации и в детско-юношеском спорте (данные собственных исследований ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», 2025 г.).

Факторы, влияющие на использование юными спортсменами СПП и БАД, включают психологическое давление тренеров и родителей, связанное с достижением спортивных результатов; стремление к идеальным параметрам телосложения; доступность для молодых спортсменов приобретения СПП и БАД. Тем не менее общепризнанно считается нецелесообразным и неприемлемым поощрять потребление БАД для повышения работоспособности молодых спортсменов, в том числе из-за риска нарушения антидопинговых правил [6, 17].

При проведении опросов спортсмены указывают, что принимают СПП для улучшения адаптации к тренировкам, укрепления иммунитета, ускорения восстановления, улучшения когнитивных функций и снижения ощущения усталости [2, 18]. Несмотря на то что спортсмены часто используют для улучшения результатов СПП с высоким содержанием углеводов и/или белков, а также БАД – источники креатина, кофеина, бета-аланина, или содержащие бикарбонат натрия, концентраты вишневого и свекольного сока, не для всех вышеуказанных компонентов опубликованы исследования, доказывающие их эффективность [2, 19, 20].

Спортсмены детско-юношеского возраста имеют не только особые потребности в пищевых веществах в различные сенситивные этапы роста и развития, но и неполностью сформированные системы детоксикации, а также метаболизации ксенобиотиков и отдельных пищевых веществ, не свойственных традиционным рецептурам блюд (консерванты, искусственные ароматизаторы и др.) [7, 19], что не позволяет рекомендовать им прием СПП и БАД, разработанных для взрослой когорты спортсменов. СПП потенциально могут как улучшить естественное развитие юных спортсменов, так и создать риски, связанные с употреблением веществ, не рекомендованных в питании детей [7, 20, 21]. Негативные эффекты способны возникать при копировании у взрослых спортсменов рекомендаций по введению в рацион СПП из-за более высоких или, наоборот, меньших потребностей детей и подростков в пищевых веществах. В последнем случае происходит чрезмерно высокое потребление, способное оказать отрицательное влияние на организм юного спортсмена [7, 22, 23]. Для нивелирования

Таблица 4. Классификация специализированных пищевых продуктов и биологически активных добавок к пище, предназначенных для спортсменов, в Формуляре Федерального медико-биологического агентства*

Table 4. Classification of sport nutrition in the Federal Medical-Biological Agency Form

Биологически активные добавки к пище, специализированные пищевые продукты
1 Базовые средства
1.1 Витаминно-минеральные комплексы
1.2 Полиненасыщенные жирные кислоты
1.3 Фосфолипиды
1.4 Пробиотики, пробиотики, синбиотики и метабиотики
2 Средства пластической направленности
2.1 Анаболизующие средства
2.2 Протеиновое питание
2.3 Аминокислоты (BCAA и другие аминокислоты)
2.4 Средства подавления катаболизма
2.5 Белково-углеводные напитки и смеси
2.6 Протеиновые батончики
3 Средства энергетической направленности
3.1 Средства экстренной компенсации энергетических затрат
3.2 Углеводные и комбинированные батончики и снеки
3.3 Креатинсодержащие средства
4 Специализированные средства
4.1 Средства защиты и восстановления связочно-суставного аппарата и костной ткани
4.2 Средства для контроля и снижения массы тела
4.3 Средства, влияющие на психофизиологические реакции
4.4 Средства для поддержки зрительной системы (каротиноиды)
4.5 Антиоксиданты, антигипоксанта, средства улучшения микроциркуляции
4.6 Средства повышения адаптации, другие специальные средства
5 Спортивные напитки – изотоники и гипотоники

* Приказ ФМБА России от 19.12.2022 № 309 «Об утверждении Формуляра лекарственных средств, биологически активных добавок к пище и изделий медицинского назначения ФМБА России, используемых для медико-биологического обеспечения спортсменов спортивных сборных команд Российской Федерации».

подобных ошибок тренерам и родителям необходимо оценить соответствие калорийности рациона потребностям в энергии молодых спортсменов и понять, являются ли тренировочные нагрузки и питание оптимальными для физического роста и развития, результативности и восстановления [20, 24]. В то же время данные по потребностям в энергии юных спортсменов старше 14 лет существенно разнятся: от 3450 до 3925 ккал/сут для мальчиков и 2825–2875 ккал/сут для девочек [17, 20, 25]. При этом важно соблюдение требований к структуре калорийности рациона, предъявляемых в конкретных видах спорта. Только при правильном соотношении суммарного содержания белков, жиров и углеводов в структуре энергетической ценности рациона введенные в рацион СПП и БАД окажут существенную помощь в оптимизации пищевого статуса спортсмена [26].

Известно, что сбалансированный рацион питания и прием СПП, сочетающих различные виды белка,

играют ключевую роль в расширении адаптационного потенциала спортсменов и влияют на эффективность тренировочного процесса [27, 28]. Важное место среди функциональных ингредиентов СПП занимают белки молока и молочной сыворотки. Несмотря на удовлетворительное среднестатистическое потребление белка в структуре рациона населения РФ в течение последних нескольких лет (в 2019 г. – 80,4 г/сут, в 2020 г. – 81,4 г/сут, в 2023 – 77,2 г, или 1,1 г/кг массы тела, в сутки у женщин и 107 г, или 1,3 г/кг массы тела, в сутки у мужчин в возрасте 14 лет и старше)⁵, для спортсменов с высокой массой тела и крайне высокими энерготратами (выше 4000 ккал/сут) эти величины на определенных тренировочных этапах будут малы [27, 28]. Для спортсменов детского возраста рекомендации по потреблению белка разнятся от диапазона 1,35–1,6 г/кг массы тела [9, 29], 1,2–1,8 г/кг [8, 17] до 2,5 г/кг [7, 9, 28] и даже 3,5 г/кг массы тела в сутки [18, 29] на отдельных этапах повышения мышечной массы тела и снижения ее жировой компоненты. В связи с этим особое внимание при разработке СПП должно быть уделено различным белковым фракциям при суммарном потреблении белка из всех источников не менее 1,2 г/кг массы тела спортсмена ежедневно для обеспечения пластических и иных функций в организме, физической работоспособности и выносливости [28].

По результатам анализа ассортимента единичные крупные российские производители за последние 15 лет начали разработку и промышленный выпуск СПП, адаптированных для детей 11–18 лет. Представленность продуктов, зарегистрированных для спортсменов детского и подросткового возраста, составила менее 1% ассортимента.

В частности, в 2010 г. в НИИ детского питания был разработан продукт молочный стерилизованный «Спортивный» в виде белково-углеводной смеси с низким содержанием жиров. В его состав вошли концентрат и гидролизат сывороточного белка, цельный молочный белок, мальтодекстрин, различные фруктово-ягодные сиропы, растительные масла, микроэлементы (железо, цинк, натрий, медь, марганец) и 12 витаминов [30].

В течение последних 10 лет специалисты ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» совместно с производителями разработали ряд СПП, предназначенных для спортсменов детско-юношеского возраста. Результаты обследований юных спортсменов, занимающихся сложнокоординационными, игровыми и циклическими видами спорта, показывают недостаточное поступление энергии, в первую очередь за счет дефицита углеводов, а в ряде случаев и невысокое потребление белка, а также витаминов, макро- и микроэлементов. С целью обеспечения потребностей в полноценном белке и энергии в виде углеводов на различных этапах спортивной деятельности в сотрудничестве с ООО «Академия-Т» для

спортсменов в возрасте 11 лет и старше были разработаны линейки СПП с 3 вкусами (ваниль, клубника или шоколад) для каждого вида продукта: «Юниор Протеин» (Junior Protein) и «Гейнер Юниор» (Junior Gainer), служащих одновременно дополнительным источником растворимых пищевых волокон и витаминов. Поскольку наиболее часто в литературе встречаются рекомендации по необходимости обеспечения адекватного потребления железа для профилактики железодефицитных состояний и анемии [3, 7, 9], в том числе как одного из компонентов синдрома дефицита энергии в спорте, было дано медико-биологическое обоснование состава и разработан БАД «Гемоспорт» для питания спортсменов с 12 лет, обеспечивающий поступление железа в легкоусвояемой гемовой форме и витаминов, участвующих в метаболизме железа в организме (А, Е, С, В₆, фолиевая кислота), в количестве не менее 15 и не более 50% от рекомендуемого суточного уровня их потребления, а также содержащей витамин В₁₂ [31].

Другим примером совместных разработок с ООО «Тенториум» для детей-спортсменов являются 6 продуктов с апикомпонентами. 4 СПП рекомендованы для питания спортсменов в возрасте старше 14 лет в период интенсивных тренировок в дополнение к основному рациону в соответствии с программой, разработанной для данных видов спорта, под наблюдением спортивного врача или специалиста по спортивному питанию. Конфеты глазированные «Медовый слиток Gold F25 ApiSpeis LIGHT» содержат углеводы, в том числе глюкозу и фруктозу, жиры, в том числе полиненасыщенные жирные кислоты, а также рутин, элеутерозиды, являются дополнительным источником витаминов А и Е, β-каротина, макроэлементов (кальций, магний). Концентрат изотонического напитка «F25 IsoDrink LIGHT» содержит углеводы, предназначен для регидратации организма в качестве дополнительного источника калия, магния, кальция с целью восстановления водно-солевого баланса. Белково-углеводный батончик «F25 ApiSpeis BAR» может служить источником белков, углеводов и ряда БАВ. Драже (гранулы) «Хлебина» с маточным пчелиным молочком, цветочной пылью и пергой в сухом виде также может быть использовано в качестве дополнительного источника углеводов и ряда БАВ при интенсивных физических нагрузках. БАД «Ф25 Маточное молочко в сухом меде» («F25 Royal Jelly in Dry Honey») рекомендуется спортсменам старше 11 лет как дополнительный источник витамина С, содержащий деценовые кислоты. Концентрат для приготовления коктейля «Прополис С immuno (иммуно)» с экстрактом прополиса и витамином С разрешен в качестве БАД спортсменам старше 11 лет как дополнительный источник витамина С, флавонов и флавоноидов. Все продукты прошли процедуру государственной регистрации, промышленно выпускаются, 8 из них включены в Формуляр ФМБА России.

⁵ Женщины и мужчины России (2024). Статистический сборник. Государственный комитет Российской Федерации (дата обращения 30.10.2025).

Представление об отсутствии отечественных фундаментальных научных исследований в области разработки инновационных компонентов СПП и БАД и создания высокотехнологичных производств по их производству давно устарело. В частности, в ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» изучают влияние различных БАВ на пищевой статус и показатели физических качеств лабораторных животных в условиях эксперимента. Перспективными в плане восстановления после физических нагрузок являются различные минорные БАВ, в том числе индолы и полифенольные соединения. Так, введение в рацион крыс антоцианинов в дозировке 15 мг/кг массы тела в виде экстракта черники или черной смородины через 4 нед на фоне физической нагрузки приводило к достоверному повышению по сравнению с группой контроля ($p < 0,05$) содержания гемоглобина (Hb) в крови (соответственно $150,7 \pm 0,9$ и $154,4 \pm 2,0$ против $145,4 \pm 0,9$ г/л в контроле), гематокрита ($44,95 \pm 0,21$ и $46,18 \pm 0,64$ против $43,78 \pm 0,32\%$) и среднего содержания Hb в эритроцитах ($18,00 \pm 0,20$ и $18,03 \pm 0,24$ против $17,35 \pm 0,24$ пг). Было показано активирующее влияние антоцианинов на адаптивный клеточный иммунитет и NK-клетки, являющиеся лимфоцитами врожденного иммунитета [32, 33].

В другом исследовании было показано, что введение в рацион крыс рутина и гесперидина в дозе 400 мг/кг массы тела; кверцетина и ресвератрола в дозе 100 мг/кг; куркумина и кверцетина в дозе 200 мг/кг; индол-3-карбинола и эпигаллокатехина галлата в дозе соответственно 50 и 200 мг/кг массы тела оказывают значительное влияние на активность и экспрессию белков и генов ферментов антиоксидантной защиты: гемоксигеназы-1 и НАД(Ф)Н-хинон оксидоредуктазы через сигнальный механизм Nrf2/Keap1/ARE, а также на посттранскрипционном уровне, стимулируя адаптационный потенциал организма [34].

Изучение влияния внутрижелудочного введения экстракта корня женьшеня (гинсенозидов) на апоптоз миофибрилл икроножной мышцы крыс после истощающей физической нагрузки у крыс-самцов линии Wistar показало дозозависимое антиапоптотическое действие на миофибриллы скелетной мускулатуры. Наиболее выраженный эффект наблюдался при введении экстракта в суточной дозе 13,5 мг/кг массы тела (в пересчете на гинсенозиды) [35]. Введение гинсенозидов также оказывало положительное влияние на энергообмен, в регуляции которого принимают участие гормоны лептин и грелин. Введение крысам максимальной дозировки экстракта – 27 мг/кг массы тела в пересчете на гинсенозиды – индуцировало активацию врожденного иммунитета через повышение относительного содержания NK- и NKT-клеток в периферической крови [36]. Результаты исследования подтверждают концепцию, согласно которой одним из механизмов адаптогенного действия БАВ женьшеня является снижение активности процесса апоптоза миофибрилл скелетной мускулатуры, индуцированного истощающей физической нагрузкой, при временной нормализации иммунного статуса.

Оценка клинических исследований эффективности специализированных пищевых продуктов с участием спортсменов детского возраста

После доклинического изучения система оценки эффективности предполагает участие в клинических исследованиях самих детей-спортсменов, однако такие исследования крайне немногочисленны. Следует отметить, что только в одном из представленных в качестве примеров исследований была проведена оценка фактического питания спортсменов и определены дисбалансы нутриума. Протоколы и результаты некоторых исследований, проведенных как в Российской Федерации, так и за рубежом представлены в табл. 5. В графе результатов приведены только статистически значимые изменения показателей основной группы.

Размер выборки в представленных работах различался более чем в 10 раз: от 7 до 76 участников; были обследованы спортсмены в возрасте от 9 до 18 лет. В 3 исследованиях участвовали только девочки [23, 37, 51], в 6 – как мальчики, так и девочки [21, 39, 40, 42, 43, 49], в остальных 12 – только мальчики. В 6 обследованиях участников называли «физически активными» людьми, но не спортсменами. В большинстве исследований оценивали влияние однократного употребления углеводсодержащих напитков. В 2 исследованиях изучали влияние приема свекольного сока с высоким содержанием нитратов на работоспособность 15–16-летних подростков [45, 53], в 1 исследовании анализировали влияние цитрата натрия на результаты 17-летних теннисистов [44]. Лишь в 3 работах отечественных авторов оценивали эффективность длительного (3–8 нед) применения апипродуктов, а в 1 – БАД, являвшейся источником гемового железа и витаминов. Контроль рациона питания за 2 дня до каждого исследования с оценкой химического состава проводили только в 1 исследовании [41], стандартный по содержанию пищевых веществ завтрак перед проведением тестирования предлагали в 7 исследованиях, и в 7 исследованиях был предусмотрен контроль потребления пищи и жидкости в течение 24 ч до первого исследования для воспроизведения рациона перед вторым исследованием.

Исследования имели различные методологии, протоколы приема СПП, условия тестирования, в том числе были использованы разные тесты, предусматривающие упражнения с отличающейся интенсивностью. И хотя такое разнообразие и отражает реальные сценарии занятий спортом, это сильно затрудняет прямое сравнение и обобщение результатов. В ряде работ показано положительное влияние на работоспособность приема СПП с углеводами, апипродуктами и железом в комплексе с витаминами, однако в некоторых исследованиях однократный прием углеводсодержащих напитков не показал своей эффективности. Употребление свекольного сока с высоким содержанием нитратов также показало неоднозначные результаты, лишь в 1 исследовании представлены положительные результаты по мощности выполняемой работы. На изменение анаэроб-

Таблица 5. Результаты оценки эффективности краткосрочного и длительного приема специализированных пищевых продуктов (СПП) и биологически активных добавок к пище (БАД) спортсменами детского-юношеского возраста в различных странах

Table 5. Results of evaluation of the effectiveness of short-term and long-term use of sport nutrition by young athletes in various countries

Страна Country	Пол, возраст, период полового созревания Gender, age (years), puberty period	Вид спорта, n Type of sport, n	Вмешательство/плацебо, срок приема Substance/The placebo, duration period	Протоколы и тесты производительности Protocols and performance tests	Результаты Results	Источники литературы Reference
РФ ¹	Д, 14–18 лет, н/д	5 видов спорта, 23 (ОГ: 12, КГ: 11)	ОГ: БАД по 3 капсулы 2 раза в день (гемоглобин бычий, концентрат белка молочной сыворотки, витамины, с содержанием, мг/сут: витамин А – 0,3, Е – 3,75, В ₆ – 0,75, В ₉ – 0,075, В ₁₂ – 0,000375, С – 22,5; железо – 5,5; белок – 2,5 г). КГ: капсулы плацебо (мальтодекстрин). 21 сут	Тест на велоэргометре до отказа со ступенчатого возрастающей нагрузкой, восстановление – 5 мин. Определяли ПАНО, МПК (непрямая калориметрия и содержание лактата в крови). Через 40 мин 30-секундный тест Вингейта на велоэргометре для оценки анаэробной работоспособности. Клинический и биохимический анализ крови, частота дыхания, артериальное давление, ЧСС, вариабельность сердечного ритма, внешнее дыхание, потребление кислорода	В ОГ: увеличилось количество эритроцитов, концентрация гемоглобина, среднее содержание гемоглобина в эритроцитах, средняя концентрация гемоглобина в эритроцитах; повысился уровень железа и сывороточного ферритина; возросло время выполнения нагрузки; снизился уровень лактата при нагрузке ($p<0.05$). Улучшились показатели вариабельности сердечного ритма, функции внешнего дыхания	[37]
РФ	М, 13,7±0,5 года, н/д	Хоккей, 29 (ОГ: 15, КГ: 14)	ОГ: набор из 4 СПП, содержащих мед, кедровый орех, пергу, маточное молочное, экстракт элеутерококка, и 2 БАД (низкомолекулярный хитозан, CO ₂ -экстракт пихты сибирской; водный экстракт прополиса); КГ: прием плацебо отсутствовал. 1 мес	Пробы с реактивной гиперемией и гипервентиляцией на ПА. Работоспособность (в Вт) оценивали на спироэргометре E-bike. Индекс напряжения ВНС в покое, «отношение дыхательного объема к мертвому пространству» оценивали на «Поли-Спектр-8/EX», общий индекс устойчивости – на Balance System Biodex. Клинический и биохимический анализы крови	ОГ: возросли эндотелий-зависимая вазодилатация ПА, уровень железа, эритроцитов, гемоглобина, белка, калия, IgG, тестостерона, индекс устойчивости и координации и работоспособность. Снизились уровни мочевины, лактата, холестерина, кортизола, IgE, индекс напряжения ВНС; спазмы ПА, артериол и венул. время восстановления после нагрузки ($p<0.05$)	[38]
РФ ¹	М и Д, 15–18 лет (17,5±0,7 года), н/д	4 вида спорта (хоккей с шайбой, плавание, лыжи, биатлон), 76 (ОГ: 42, КГ: 34)	ОГ: изотоник, содержащий мед – 50 г, разведенный в 1000 мл воды (фруктоза – 22,5 г, глюкоза – 21 г, сахара – 0,5 г, натрий – 700 мг, магний – 8 мг, кальций – 176 мг, калий – 176 мг, 180 ккал) во время тренировок и в течение 2 ч после нее; ГК: 95% пили воду и 5% – изотоник «Х», количество – по желанию. 1 мес	Биоимпедансометрия (InBody 770): общее количество жидкости, абсолютные и относительные доли внутри- и внеклеточной жидкости, соотношение внеклеточной жидкости и общего количества жидкости. Оценивали гематокрит, удельный вес и цветность утренней мочи, пробы с реактивной гиперемией и гипервентиляцией на ПА, включая определение индекса эндотелиальной чувствительности	Показана высокая регидратирующая эффективность изотонического медового напитка. Снижение удельной плотности и цветности утренней порции мочи ($p<0.05$). Отношение абсолютных и относительных долей внутри- и внеклеточной воды приблизилось к норме. Установлены обратные корреляции между показателем гематокрита и объемом внеклеточной и общей воды и долей внеклеточной воды, соотношением объема внеклеточной и общей воды и удельным весом мочи и ее цветом, прямые – между долей внутриклеточной жидкости и удельным весом мочи и ее цветом	[39]

Продолжение табл. 5

Страна Country	Пол, возраст, период полового созревания Gender, age (years), puberty period	Вид спорта, <i>n</i> Type of sport, <i>n</i>	Вмешательство/плацебо, срок приема Substance/The placebo, duration period	Протоколы и тесты производительности Protocols and performance tests	Результаты Results	Источники- литературы Reference
РФ	ОГ: М Д 17,1±0,5 года, н/д КГ1: М Д 16,3±1,1 года, н/д КГ2: М Д 16,8±0,4 года н/д	58 50 8 4 вида спорта 32 26 6 Не спортсмены 30 25 5 4 вида спорта	ОГ: СПП – 3 слитка-конфеты глазированных, содержащие пергу, мед, орех кедровый, экстракт прополиса, молочко маточное пчелиное, хитозан, низкомолекулярный (УВ – 23,2 г, жиры, в том числе полиненасыщенные жирные кислоты – 9,8 г, флавоноиды – 1,6 мг, витамин А, (β-каротин) – 0,9 (5,2) мг, витамин Е – 0,29 мг, кальций – 53,0 мг, магний – 21,0 мг; 180 ккал), 2 мес. КГ1 и 2 не принимали, КГ2 – одинаковые условия питания/проживания, что и у ОГ	Психомоционально-волевой статус (шкала тревожности Спилберга–Ханина, тестирования САН: Самочувствие, Активность и Настроение). Определяли максимально достигнутую нагрузку, максимальное потребление кислорода, время достижения до ПАНО, уровни систолического артериального давления, ЧСС и нейровегетативного индекса напряжения по Р. Баевскому. Проба с гипервентиляцией на ПА. Клинический и биохимический анализ крови	Понизился уровень кортизола, повысились содержание эритроцитов, гемоглобина. Улучшился психомоциональный статус (повышение общего самочувствия, активности, улучшение настроения за счет нормализации ранее заниженной самооценки, снижение ситуативной тревожности). Восстановления функции эндотелия ПА: рост эндотелий-зависимой вазодилатации и снижение эндотелий-зависимой вазоконстрикции, а также спазма артерий на пике пробы с гипервентиляцией и вазоконстрикции венул. Понижение нейровегетативного индекса напряжения, рост максимального потребления кислорода, времени достижения ПАНО, максимально достигнутой нагрузки и скорости кровотока в ПА на пике пробы. Сократилось время восстановления после нагрузки ($p \leq 0,02$)	[40]
Англия ³	М, 15,6±0,2 года, н/д	Футбол, 10	Напиток с электролитами и 6% УВ (сахароза, хлорид натрия – 23 мМ Na) 500 мл + завтрак (350 ккал, 54 г УВ) за 2 ч до тренировки. УВ 1,3 г/кг МТ (500 мл). Во время тренировки: 0,8 г/кг МТ в 8 приемов по 14 мл/кг МТ в ч (1874±40 мл). Плацебо – напиток с электролитами с подсластителем (натрия хлорид, сахарин)	Проведение 2 футбольных матчей между тестовой командой и аналогичной командой-соперником длительностью 90 мин из 2 таймов по 45 мин, разделенных 15-минутным периодом пассивного восстановления. Контроль рациона за 2 дня до каждого исследования (2761±152 ккал/сут, из них белки – 16±1%, жиры – 31±2%, УВ – 53±2%). Отбор проб крови каждые 15 мин в течение матча	Более высокий уровень глюкозы в крови в конце первой половины (30–45 мин) матча, однако во втором периоде различия с КГ отсутствовали из-за временного снижения пиковых значений в перерыве. Отсутствие влияния на изменение концентрации лактата в крови. На протяжении всего матча ЧСС и доля времени в разных зонах ЧСС не различались. Прием УВ не привел к повышению интенсивности работы	[41]
Англия ²	М, Д 13,3±0,5 года, 3-я и 4-я стадии полового созревания	Командные игры (футбол, регби, хоккей на траве), 7 (М – 5, Д – 2)	Раствор с содержанием УВ 2% (низкое), 6% (умеренное) и 10% (высокое) и электролитами, мг/л: натрий – 250; магний – 60; калий – 90; кальций – 20. Первое ознакомительное тестирование и 2 основных тестирования с перерывом 3–7 сут. За 5 мин до тестирования после 10-минутной разминки – 5 мл/кг МТ, во время тренировки – 2 мл/кг МТ каждые 15 мин в течение 1-го часа. УВ – 0,8 г/кг МТ. Контроль потребления пищи и жидкости в течение 24 ч до первого исследования – для воспроизведения перед вторым исследованием	Тестирование: часть А – тест LIST из 4 блоков по 15 мин с 3-минутным периодом восстановления; часть В – интервальный бег до истощения. Регистрировали ЧСС, проводили оценку воспринимаемой нагрузки с использованием детской шкалы (от 0 до 10), чувства наполненности кишечника и дискомфорта в желудке, оценивали потерю МТ, рассчитывали скорость потоотделения	Время до истощения было максимальным, на 34% выше при использовании 6% раствора УВ по сравнению с 10% раствором ($p < 0,05$) при отсутствии достоверных различий при приеме 2% УВ или между приемом 2 и 10% ($p \leq 0,10$). Расстояние, пройденное в части В, было также максимальным при приеме 6% УВ – на 32% больше, чем при приеме 10% УВ ($p < 0,05$), и на 15%, чем при приеме 2% ($p = 0,09$). Авторы пришли к выводу, что прием 6% раствора УВ с электролитами значительно улучшает выносливость подростков, у которых эффективность метаболизма УВ, по-видимому, не полностью оптимизирована по сравнению со взрослыми	[21]

Продолжение табл. 5

Страна Country	Пол, возраст, период полового созревания Gender, age (years), puberty period	Вид спорта, n Type of sport, n	Вещательство/период срока приема Substance/The placebo, duration period	Протоколы и тесты производительности Protocols and performance tests	Результаты Results	Источники литературы Reference
Англия ²	М, Д, 12,7±0,8 лет, 3-я и 4-я стадии полового созревания	Командные игры, 15 (М – 10, Д – 5)	Раствор без УВ или с содержанием УВ 6% (мальтодекстрин) и электро- литами, мг/л: натрий – 250; магний – 60; калий – 90; кальций – 20. Первое ознакомительное тестирование и 2 основных тестирования с переры- вом 3–7 сут. За 5 мин до тестирова- ния после 10-минутной разминки – 5 мл/кг МТ, во время тренировки – 2 мл/кг МТ каждые 15 мин в течение первого часа. 0,8 г/кг МТ мальтодек- стрина. Контроль потребления пищи и жидкости в течение 24 ч до первого исследования – для воспроизведения перед вторым исследованием	Тестирование: часть А – тест LIST из 4 блоков по 15 мин с 3-минутным периодом восстановления; часть В – интервальный бег до изнемо- жения. Регистрировали ЧСС, проводили оценку воспринимаемой нагрузки с использованием детской шкалы (от 0 до 10), чувства наполненности кишечника и дискомфорта в желудке, оценивали потерю МТ, рассчитывали скорость потоотделения	Время до истощения (пройденное рассто- яние) было на 24,4% выше при приеме УВ ($p<0,05$) при отсутствии влияния на сред- нее и пиковое время бега на 15 м, ЧСС. Прием 6% раствора УВ с электролитами значительно улучшает выносливость под- ростков во время симуляции командных игр	[42]
Англия ²	М, Д 12–14 лет, 13,5±0,7 года, 1–2-я стадии полово- го созревания	Командные игры, 11 (М – 10, Д – 1)	Гель с УВ (мальтодекстрин) или без УВ с подсластителем. За 5 мин до тестирования после 10-минутной разминки – 0,818 мл/кг МТ геля + 5 мл/кг МТ воды, во время трени- ровки – 0,327 мл/кг МТ + 5 мл/кг МТ воды каждые 15 мин в течение части А (УВ 38,0±5,5 г/ч, или 0,78 г/кг МТ). Первое ознакомительное тестирование и 2 основных тестирования с пере- рывом 10 сут. Контроль потребления пищи и жидкости в течение 24 ч до первого исследования – для воспроиз- ведения перед вторым исследованием	Тестирование: часть А – тест LIST из 4 блоков по 15 мин с 3-минутным периодом восстановления; часть В – интервальный бег до изнемо- жения. Регистрировали ЧСС, проводили оценку воспринимаемой нагрузки с использованием детской шкалы (от 0 до 10), чувства наполненности кишечника и дискомфорта в желудке, оценивали потерю МТ, рассчитывали скорость потоотделения	Прием УВ сопровождался повышением времени (расстояния) бега до отказа на 21,1% ($p<0,05$) при отсутствии влияния на среднее и пиковое время бега на 15 м, ЧСС. Прием геля с УВ повышает выносли- вость у подростков, не оказывая влияния на спринтерские показатели или физио- логические реакции во время симуляции командных игр	[43]
Бразилия ²	М, 17±1 год, н/д	Профессио- нальный теннис, 10	Цитрат натрия – 0,5 г/кг МТ в виде капсул за 2 ч до тренировки (тестов). Плацебо – 0,1 г/кг МТ NaCl. Стандартный завтрак: коктейль, содержащий УВ (2 г/кг МТ) и сыворо- точный белок (1 г/кг МТ), за 30 мин до взятия крови. Первое ознакомительное тестирова- ние и через 3 дня 2 основных тести- рования с перерывом 10 дней	Тесты на определение навыков: игры в теннис, спринтерской игры до и после имитационного матча в течение 60 мин. Взятие крови за 2 ч до тестов и после матча – определение рН, концентрации бикарбоната и лактата. Проводили оценку воспринимаемой нагрузки	При приеме цитрата натрия наблюдались более высокие метаболические показатели (рН, бикарбонат и лактат крови) как до, так и после матча ($p<0,001$), большая (в 1,4 раза) стабильность ударов после матча ($p<0,01$) и больше (в 1,3 раза) количество выигранных геймов во время имитации матча ($p<0,001$) при отсутствии дискомфорта в желудочно- кишечном тракте. Количество выигранных геймов в моделируемом матче положитель- но коррелировало с процентом постоянства ударов ($r=0,67$, $p<0,001$). Вывод: цитрат натрия является эффективным эргогенным средством для повышения эффективности квалифицированных теннисистов	[44]

Продолжение табл. 5

Страна Country	Пол, возраст, период полового созревания Gender, age (years), puberty period	Вид спорта, n Type of sport, n	Вмешательство/плацебо, срок приема Substance/The placebo, duration period	Протоколы и тесты производительности Protocols and performance tests	Результаты Results	Источники литературы Reference
Испания ²	М, 15–16 лет	Баскетбол, 10	140 мл концентрированного свекольного сока с содержанием нитрата 400 мг (12,8 ммоль NO ₃ ⁻) за 3 ч до тренировки. Плацебо – сок с низким содержанием (0,08 ммоль NO ₃ ⁻). Все участники: накануне рациона с содержанием УВ 60%, жиров 30% и белков 10%, отсутствие свеклы, шпината, сельдерея	Прыжок с места в противовоход, изометрическая сила хвата, модифицированная версия 1-теста на ловкость, спринтерские забеги на 10 и 20 м, 40-минутная игра в баскетбол, во время которой с помощью GPS анализировали расстояние, скорость, ускорение и замедление	Не обнаружено существенных различий у молодых тренированных баскетболистов	[45]
Канада ¹	М, 10,2±1,3 1-я и 2-я стадии полового созревания	11	Прием УВ 1 г/кг МТ (глюкозы) в виде напитка или плацебо за 30 мин до тренировки. Питьевой режим: вода. Легкий завтрак, соблюдение той же диеты за день до каждого теста. Первое ознакомительное тестирование и 2 основных тестирования с перерывом 1–2 нед	4 теста Вингейта: на велоэргометре с 2-минутным восстановлением, с вращением педалей в течение 5 с без нагрузки со скоростью 60 об/мин перед первым подходом и в период восстановления	Не смотря на значительно более высокий уровень глюкозы в крови до тренировки перед приемом УВ, после тренировки различий в уровне глюкозы не наблюдалось. Прием УВ не влиял на выходную (пиковую и среднюю) мощность или индекс утомления при повторных выполнениях анаэробного теста	[46]
Канада ²	М, 9–10 лет, 1–2-я стадии полового созревания Мужчины, 20–25	10, не спортсмены, но физически активные 10, аналогично	Напиток с содержанием УВ 6% (4% сахарозы; 2% глюкозы) и электролитами (~18 мМ Na ⁺ , ~3 мМ K ⁺) до и каждые 15 мин во время тренировки общим объемом 24 мл/кг МТ. Плацебо – ароматизированная вода с подсластителем УВ – 1,4 г/кг МТ. Плацебо – ароматизированная вода с подсластителем и электролитами. Мальчики: тест с джемом на завтрак (90 ккал). Мужчины: тест с джемом на завтрак (180 ккал). Первое ознакомительное тестирование и 2 основных тестирования с перерывом 1–2 нед	На велоэргометре на уровне 70% VO ₂ max в течение 2 подходов по 30 мин с 5-минутным перерывом между ними. Определяли потребление кислорода, объем и частоту дыхания, восприятие переносимости нагрузки (шкала Борга 6–20) и ЧСС. Определяли глюкозу крови до и после теста	При приеме УВ наблюдался более высокий уровень глюкозы после тренировки (на 19%, p<0,001) и лактата (на 11%, p<0,01), немного выше ЧСС (p=0,047) при отсутствии влияния на потребление кислорода, вентиляцию легких, частоту дыхания или восприятие переносимости нагрузки. Выводы: более высокий и быстрый рост оценки воспринимаемого напряжения во время нагрузки у мальчиков по сравнению с мужчинами может отражать чувствительность к частоте дыхания, что перевешивает любое влияние приема УВ	[47]
Канада ²	М, 9–10 лет, 9,8±0,1 года, 1–2-я стадии полового созревания Мужчины, 20–25 лет 22,1±0,5 года	12, не спортсмены, но физически активные 10, аналогично	Напиток с содержанием УВ 6% (4% ¹³ C сахарозы; 2% ¹³ C глюкозы) и электролитами (~18 мМ Na ⁺ , ~3 мМ K ⁺) до и каждые 15 мин во время тренировки общим объемом 24 мл/кг МТ. УВ – 1,7 г/кг МТ. Плацебо – ароматизированная вода с подсластителем и электролитами. Стандартный завтрак: тест с джемом без сахара, мальчики – 90 ккал, мужчины – 180 ккал. Первое ознакомительное тестирование и 2 основных тестирования с перерывом 1–2 нед. Соблюдение той же диеты за день до каждого теста, исключение продуктов из кукурузы	Тест на велоэргометре на уровне 70% VO ₂ max в течение 2 подходов по 30 мин с 5-минутным перерывом между ними. Использование субстрата во время тренировки оценивали в последние 30 мин с помощью измерения потребления меченых ¹³ C УВ. Оценивали МПК, выделение CO ₂ , анализировали соотношение ¹³ C/ ¹² C в выдыхаемом CO ₂ , ЧСС, рассчитывали COV, COX. Забор образцов выдыхаемого воздуха в течение 3 мин в состоянии покоя за 30 мин до тренировки после завтрака, на 12-й и 27-й минуте каждого подхода. Забор образцов крови за 30 мин до тренировки и сразу после нее (глюкоза и лактат)	Коэффициент дыхательного обмена у мальчиков после приема УВ не изменялся с течением времени, тогда как после приема плацебо снижался с 0,91±0,01 до 0,88±0,01 (p<0,001). Соотношение ¹³ C/ ¹² C в выдыхаемом CO ₂ после приема УВ заметно увеличилось при физическом усилии в обеих группах (p<0,01), тогда как после приема плацебо у мальчиков не изменялось. После приема УВ окисление их эндогенных запасов в течение последних 30 мин нагрузки было ниже на 24,2±6,3% у мальчиков (у 10 из 12) и на 14,7±3,0% у мужчин (у 9 из 10), а окисление общих жиров имело тенденцию	[22]

Продолжение табл. 5

Страна Country	Пол, возраст, период полового созревания Gender, age (years), puberty period	Вид спорта, n Type of sport, n	Вмешательство/плацебо, срок приема Substance/The placebo, duration period	Протоколы и тесты производительности Protocols and performance tests	Результаты Results	Источник лите- ратуры Reference
Канада ²	Д, 12 лет, 1-я стадия полового созревания	12	Напиток с содержанием УВ 6% (4% сахарозы; 2% ¹³ C глюкозы) и электролитами (~18 mM Na ⁺ , ~3 mM K ⁺) до и каждые 15 мин во время тренировки общим объемом 28 мл/кг МТ. УВ – 1,7 г/кг МТ.	Тест на велоэргометре на уровне 70% VO ₂ max в течение 2 подходов по 30 мин с 5-минутным перерывом между ними. Использование субстрата во время тренировки оценивали в последние 30 мин с помощью измерения потребления меченных ¹³ C экзогенных УВ.	к повышению ($p=0,08$) при приеме плацебо. Концентрация глюкозы в крови после тренировки была выше после приема УВ ($p<0,05$). Вывод: относительный вклад окисления экзогенных УВ в общий энергетический обмен у мальчиков значительно выше (~22%) по сравнению с мужчинами (~15%)	[23]
	Д, 14 лет, 4-я стадия полового созревания	10	Плацебо – ароматизированная вода с подсластителем и электролитами. Стандартный завтрак: тост с джемом без сахара (младшие – 90 ккал, старшие – 180 ккал) с 12 мл/кг напитка. Первое ознакомительное тестирование и 2 основных тестирования с перерывом от 4 дней до 4 нед. Соблюдение той же диеты за день до каждого теста, исключение продуктов из кукурузы	Оценивали МПК, выделение CO ₂ , анализировали соотношение ¹³ C/ ¹² C в выдыхаемом CO ₂ , рассчитывали COV, COЖ. Забор образцов выдыхаемого воздуха в течение 5 мин на 12–17-й и 25-й минуте второго подхода. Забор образцов крови натощак за 40 мин до тренировки и сразу после нее (глюкоза, лактат, гормоны)	Менее выраженный рост уровня гормона роста после приема УВ ($p<0,05$). Коэффициент респираторного обмена при приеме плацебо был существенно ниже у младших девочек ($p<0,05$), а у старших не различался. Снижение окисления жиров примерно на ~50% в младшей группе, но не в старшей ($p<0,001$) и окисления эндогенных УВ на ~15% у более старших ($p=0,006$) после приема УВ. Уровни эстрадиола в сыворотке крови у всех девочек отрицательно коррелировали с окислением жиров и положительно – с окислением эндогенных УВ, но не экзогенных УВ. Вывод: прием УВ-напитка по-разному влияет на использование эндогенных субстратов в зависимости от возраста, хотя общее окисление экзогенных УВ во время нагрузки не различалось. Существуют потенциальные половые различия в использовании энергетических субстратов даже в детском возрасте	
Канада ²	М, 12 лет, препубертатный ранний, средний, поздний средний, поздний	20 7 7 6	Напиток с содержанием УВ 6% (4% сахарозы; 2% глюкозы) ¹³ C и электролитами (~18 mM Na ⁺ , ~3 mM K ⁺) до и каждые 15 мин во время тренировки. УВ – 1,7 г/кг МТ. Плацебо – ароматизированная вода с подсластителем и электролитами. Все: небольшой завтрак с 12 мл/кг напитка (0,7 г/кг МТ УВ)	Тест на велоэргометре на уровне 70% VO ₂ max в течение 2 подходов по 30 мин с 5-минутным перерывом между ними. Использование субстрата во время тренировки оценивали в последние 30 мин с помощью измерения потребления меченных ¹³ C экзогенных УВ	Потребление УВ снизило окисление жиров и увеличило окисление общих УВ ($p<0,001$) независимо от группы. У мальчиков препубертатного и раннего пубертатного возраста наблюдалась более высокая зависимость от потребляемых УВ, что способствовало сохранению гликогена. У мальчиков среднего и позднего пубертатного возраста показано более высокое окисление эндогенных УВ, что коррелировало с уровнем тестостерона	[48]
	М, 14 лет	9				
	1–5-я стадии полового созревания					

Продолжение табл. 5

Страна Country	Пол, возраст, период полового созревания Gender, age (years), puberty period	Вид спорта, n Type of sport, n	Вмешательство/плацебо, срок приема Substance/The placebo, duration period	Протоколы и тесты производительности Protocols and performance tests	Результаты Results	Источники литературы Reference
Малайзия ²	М и Д, 10–12 лет, н/д	58, н/д	1) 11 г солодового экстракта, 6,5 г молока и 0,44 г сукралозы; 2) 11 г сахарозы и 6,5 г молока; 3) 6,5 г молока и 0,56 г сукралозы; 4) плацебо – 150 мл воды и 0,56 г сукралозы. Стандартизованный завтрак за 2–2,5 ч перед тестированием. Прием про-дуктов за 20 мин до тренировки	Время, затраченное на 4 игровых упраж-нения (бадминтон, сквош, футбол и «прыжки в эстафете»), составило 24 мин с перерывами по 90 с. 7 тестов на внимание и память до и после трени-ровки	Прием солодового экстракта положи-тельно влиял на концентрацию внимания ($p=0,04$), а сахарозы – на бдительность ($p=0,022$)	[49]
Португа-лия ²	М, 14–15 лет (14,8±0,4), н/д	Баскетбол, 12	3 группы (по 4 спортсмена): А. Без жидкости. Б. Вода без ограничения (1,11±0,47 л). В. Напиток с содержанием УВ 8% (7,2% сахара, 0,8% мальтодекстрина) с электролитами (510 мг/л Na) без ограничений (1,14±0,38 л)	3 тренировки по 30 мин с перерывом на 60 с для приема жидкости. После трени-ровки – 30-минутный комплекс упражне-ний по баскетболу (броски с 2 и 3 точек, штрафные броски, челночный бег и зигзаги в защите). Определяли МТ (до и после сеансов), степень восприни-маемой нагрузки, цвет мочи	Снижение МТ было значительно выше в группе А (2,46±0,87%), чем в 2 других (Б, 1,08±0,67%, $p=0,006$; В, 0,65±0,62%, $p=0,001$), и в группе Б, чем в группе В ($p=0,012$). Степень воспринимаемой нагруз-ки была выше в группе Б, чем в группе А и В ($p=0,002$). В группе А более высокий уро-вень обезвоживания и усиление ощущения нагрузки не повлияли на результаты в упражнениях по баскетболу по сравнению с группой В. Не выявлено влияния на резуль-таты комплекса упражнений по баскетболу	[50]
США ²	Д, 10 лет Ме 10,4 года, до наступления менархе	10, н/д	Напиток с содержанием УВ 6% (сахароза и мальтодекстрин – 0,6 г/кг МТ), всего УВ 19 г, всего 9 мл/кг МТ перед тренировкой. Плацебо – нап-ток без УВ. Сбалансированный прием пищи (без контроля потребления УВ) за 3–4 ч до тренировки. Первое озна-комительное тестирование и 2 основных	На беговой дорожке упражнение с 2 подходами по 15 мин (10 повторений с мощностью 20, 55 и 95% от $\dot{V}O_{2max}$ и максимальный спринт) и затем спринт на результативность продолжитель-но-стью 1 мин. Определяли среднюю и пиковую мощность, ЧСС, субъективную оценку воспринимаемой нагрузки	По сравнению с плацебо прием УВ не повлиял на физиологические, перцеп-тивные или рабочие реакции	[51]
США ²	М, 11,1±0,9 года, 1–2-я стадии полово-го созревания Мужчины 23,8±2,1 года	8 11	Раствор с содержанием УВ 6% за 15 мин до и во время тестирования (2,5 мл/кг МТ). Плацебо: подкрашен-ная вода без УВ. Первое ознакоми-тельное тестирование и 2 основных. Все: контролируемый завтрак – рас-творенный напиток Carnation [®] , приго-товленный на молоке без сахара – 12 г УВ (60 ккал); муж-чины – 2 порции за 1,5 ч до тести-рования. Соблюдение той же диеты за день до каждого теста	Три 12-минутных цикла езды на велоси-пед с увеличивавшейся через каждые 20–30 с интенсивностью с 25, 50, 75% и до 125% от МПК (шесть 2-минутных циклов). Контролировали ЧСС, воспри-нимаемую нагрузку дважды, уровень глюкозы и лактата в капиллярной крови (собранный 5 раз за 30 и 0 мин до трени-ровки и после каждого цикла), уровень газообмена в легких (дыхательный кла-пан с мундштуком и зажим для носа) – измеряли объем вдыхаемого воздуха, в образцах выдыхаемого воздуха ана-лизировали концентрацию O_2 и CO_2 во время второго цикла	У детей уровень глюкозы в крови и коэф-фициент дыхательного обмена были выше во время упражнений при приеме УВ по сравнению с плацебо, но не установлено существенное влияние на уровень лактата в крови, ЧСС и самооценку нагрузки	[52]

Окончание табл. 5

Страна Country	Пол, возраст, период полового созревания Gender, age (years), puberty period	Вид спорта, <i>n</i> Type of sport, <i>n</i>	Вмешательство/плацебо, срок приема Substance/The placebo, duration period	Протоколы и тесты производительности Protocols and performance tests	Результаты Results	Источники литературы Reference
США ²	М, 16,8±1,0 года, н/д	12, н/д	Свекольный сок с содержанием нитратов – 2×70 мл (~12,9 ммоль NO ₃ ⁻ ; Beet It Sport) за 2,5 ч до тестирования. Плацебо – свекольный сок с пониженным содержанием нитратов (~0,0068 ммоль NO ₃ ⁻). Первое ознакомительное тестирование и 2 основных с промежутком не менее 3 сут. Соблюдение той же диеты за день до каждого теста	Модифицированный тест Вингейта: 4 теста до отказа по 20 с с 4-минутными перерывами на отдых. Тест изометрической тяги с середины бедра. Определяли максимальную, среднюю выходную мощность, индекс утомления	Пиковая изометрическая сила при тяге с середины бедра была на 9,4% выше после приема свекольного сока ($p=0,004$). Наблюдалась тенденция к снижению систолического артериального давления до начала упражнений ($p=0,069$) после приема свекольного сока при отсутствии влияния на другие показатели. Вывод: употребление свекольного сока с высоким содержанием нитратов может повысить максимальную мощность у подростков мужского пола	[53]
США ³	М, 15,2±0,9 года, 3–4-я стадии полового созревания	Физически активные, 13, н/д	Напиток с содержанием УВ 22% 1,5 г/кг МТ УВ (глюкозы) за 30 мин до тренировки. Плацебо – вода с подсластителем. У всех: завтрак – 5 г жиров, 15 г УВ и 12 г белков (150 ккал). 2 основных тестирования	2 протокола анаэробного теста Вингейта (WAnT) из пяти 10-секундных спринтов с 60-секундным активным восстановлением между каждым спринтом	Более высокая концентрация глюкозы и инсулина в крови после приема УВ ($p<0,05$) без изменений концентрации лактата и катехоламинов. Повышение средней пиковой мощности во время первого анаэробного теста Вингейта ($p<0,025$) при отсутствии влияния на индекс утомляемости	[54]

Пр и м е ч а н и е. Индексом обозначен дизайн исследования: ¹ – рандомизированное исследование; ² – двойное слепое рандомизированное плацебо-контролируемое исследование; ³ – двойное слепое рандомизированное плацебо-контролируемое исследование. Д – девочки; М – мальчики; н/д – нет данных; ВНС – вегетативная нервная система; ОГ – основная группа; КГ – контрольная группа; МПК – максимальная скорость потребления кислорода; МТ – масса тела; ПА – плечевая артерия; ПАНО – порог аэробного и анаэробного обмена; СОЖ – скорость окисления жиров; СОУ – скорость окисления углеводов; ЧСС – частота сердечных сокращений; УВ – углеводы; VO_{2max} – максимальная аэробная мощность.

ных показателей может влиять исходное физическое состояние. При этом высококвалифицированные спортсмены демонстрируют ограниченную реакцию на прием источника нитратов, а активные подростки – большой прирост мощности (выполняемой нагрузки), возможно, из-за меньшей тренированности и адаптации к физической нагрузке [45, 53].

На результатах приема СПП юными спортсменами отражаются не только физическое развитие, но и такие факторы, как половое созревание, гендерная принадлежность и так далее; они влияют на рост, обмен веществ и физиологические возможности организма. Так, например, у мальчиков препубертатного и раннего пубертатного возраста наблюдалась более высокая зависимость от приема углеводных напитков, что способствовало сохранению гликогена, а у мальчиков среднего и позднего пубертатного возраста выявлено более высокое окисление эндогенных углеводов [48].

В целом представленные работы имеют ряд существенных ограничений, в первую очередь из-за небольших размеров выборок, отсутствия оценки фактического питания, т.е. невозможности оценить вклад исследуемого пищевого компонента в рацион, а также срока приема. Несмотря на трудности, с которыми сталкиваются исследователи в этой области, представленные результаты показывают, на что следует обратить внимание в будущих работах, позволяя улучшить протокол исследований. Крайне важны проспективные исследования для определения причинно-следственных связей и отслеживания изменений в поведении с течением времени и в определенные периоды тренировок, например во время соревнований или после них.

Нормативная база в области питания детей-спортсменов

Требования к рационам питания детей в организованных коллективах изложены в СанПиН 2.3/2.4.3590-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организации общественного питания населения»⁶. Калорийность рациона, содержание макронутриентов, витаминов, макро- и микроэлементов утверждены для организованного питания детей и подростков разных возрастных групп. С учетом повышенных потребностей за счет физической нагрузки во время тренировок и соревнований наиболее приемлемыми можно считать минимальные наборы продуктов для детей, обучающихся в 5–8-х и 9–11-х классах образовательных организаций кадетского типа и кадетской направленности.

Масса продуктов в таких наборах и блюд из них в среднем на 25% выше, чем для детей, не имеющих повышенных физических нагрузок. Потребность в энергии для детей в возрасте 7–10 лет определена в МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации»⁷ в 2100 ккал/сут, для девочек 11–14 лет она увеличивается до 2300 ккал/сут, для мальчиков 11–14 лет и для девушек 15–17 лет равна 2500 ккал/сут, для юношей 15–17 лет – 2900 ккал/сут. Наборы продуктов представлены для детей с обычной физической нагрузкой из расчета 2350 ккал/сут в 7–11 лет, 2720 ккал/сут в возрасте 12 лет и старше, для кадетов 5–8-х классов – из расчета до 3500 ккал/сут, 9–11-х классов – до 4000 ккал/сут.

Следует отметить, что п. 8.1.2.4 СанПиН 2.3/2.4.3590-20 установлено, что «на период летнего отдыха и оздоровления (до 90 дней), в выходные, праздничные и каникулярные дни, при повышенной физической нагрузке (спортивные соревнования, слеты, сборы и тому подобное) нормы питания, включая калорийность суточного рациона, должны быть увеличены не менее чем на 10,0% в день на каждого человека», что и отразилось на энергетической и пищевой ценности наборов продуктов для кадетов 2 возрастных групп.

Дополнительную информацию по 7 рационам с энергетической ценностью от 2350 до 4600 ккал/сут можно получить в «Методических рекомендациях по питанию юных спортсменов»⁸.

В МР 2.3.1.0253-21 представлены нормы физиологической потребности не только в основных пищевых веществах, витаминах, макро- и микроэлементах в зависимости от возраста, но и потребности в некоторых биологически активных минорных веществах. Так, для детей 7–18 лет адекватные уровни потребления карнитина составляют 100–300 мг/сут, холина – 200–500 мг/сут, миоинозита (инозита) – 200–500 мг/сут, флавоноидов – 150–250 мг/сут, в том числе флаван-3-олов (катехинов) – 50–100 мг/сут.

Обследование баскетболистов подросткового возраста показало хорошую обеспеченность витаминами С и А, но неудовлетворительную обеспеченность витаминами группы В у 59–77% обследованных, витамином Е – у 24–54%. При этом среди мальчиков не было ни одного адекватно обеспеченного всеми изученными витаминами, а среди девочек синхронно обеспечены этими микронутриентами были лишь 12%. Одновременный дефицит 3–4 витаминов встречался среди мальчиков в 1,8–2,3 раза чаще [55]. Оценка обеспеченности витаминами 39 занимающихся плаванием детей 11–17 лет пока-

⁶ «Санитарно-эпидемиологические требования к организации общественного питания населения». Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 27.10.2020 № 32 (ред. от 22.08.2024).

⁷ Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 22 июля 2021 г.).

⁸ Методические рекомендации по питанию юных спортсменов (утв. Председателем Межведомственного научного совета ФАНО и РАН по медицинским проблемам питания академиком РАН В.А. Тутельяном 10.02.2017).

зала адекватную обеспеченность витамином А, однако концентрация витамина Е не достигала нижней границы нормы у 30,8% детей, витамина В₂ – у 53,8%, у 79,5% обследованных концентрация β-каротина в крови была ниже оптимальной. Сочетанный недостаток 2–4 витаминов имел место у 73,9% мальчиков и 56,2% девочек [56]. Дефицит витамина D был установлен у 42,9% из 527 обследованных спортсменов в возрасте от 10 до 18 лет, занятых в 24 видах спорта [57].

Таким образом, перспективным следует считать разработку БМК для спортсменов детского возраста с содержанием БАВ на уровне не менее 50% и не более 200% (в соответствии с едиными требованиями⁹) от нормы физиологической потребности в конкретном возрастном периоде.

Установленные в нормативных и методических документах уровни физиологической потребности в пищевых веществах позволяют ориентироваться в части медико-биологического обоснования при разработке рецептур СПП и БАД и рекомендаций по их применению для спортсменов детского возраста с учетом требований технических регламентов Таможенного союза (ЕАЭС) и единых требований¹⁰ к специализированной пищевой продукции для детей.

При этом следует исходить из того, что формы разрешенных для использования при производстве БАД к пище для взрослых и детей старше 3 лет приведены в единых требованиях¹¹ в Приложении 7, а при производстве специализированных пищевых продуктов для питания спортсменов – в Приложении 11. В БАД к пище для детей 3–14 лет разрешается использовать только витамины и минеральные вещества, пищевые волокна, пробиотики и пребиотики, а также лекарственное сырье, указанное в Приложении 11¹² и Приложении 8 ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции», а суточная доза не должна превышать для витаминов А, D, минеральных веществ (селен, медь, цинк, йод, железо) 100% от суточной физиологической потребности, для водорастворимых витаминов и других жирорастворимых витаминов и других минеральных веществ – 200%.

В соответствии со ст. 8 ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» пищевая продукция для детского питания не должна содержать подсластителей (п. 5), консервантов – бензойной, сорбиновой кислот и их солей (п. 7), могут использоваться только натуральные пищевые ароматизаторы (вкусоароматические вещества) (п. 12), а при необходимости использования кра-

сителей следует отдавать предпочтение натуральным. В случае использования таких красителей, как азорубин Е122, желтый хинолиновый Е104, желтый «солнечный закат» FCF Е110, красный очаровательный АС Е129, понсо 4R Е124 и тартразин Е102, на продукцию должна наноситься предупреждающая надпись «содержит краситель (красители), который (которые) может (могут) оказывать отрицательное влияние на активность и внимание детей» согласно ст. 9 ТР ТС 029/2012 «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств».

Важнейшую роль в иммунном статусе человека играет кишечная микробиота. Поскольку юные спортсмены подвержены высоким физическим и психоэмоциональным нагрузкам, целесообразно введение в их рацион СПП и БАД с достаточным содержанием пробиотиков и пребиотиков, преимущественно мультикомпонентных (мультиштаммовых, синбиотических), что может оказать положительное влияние на модуляцию кишечного микробиома и оптимизацию иммунной защиты [58], особенно в пубертатный период спортсменов.

Заключение

Проведенный обзор рынка показал, что, несмотря на высокую востребованность у потребителя СПП для питания спортсменов, такая продукция в секторе детско-юношеского возраста представлена единичными наименованиями отечественного производства и отсутствует в импортном сегменте.

Перспективными компонентами СПП для питания детей-спортсменов являются различные виды белка, углеводов, витамины, макро- и микроэлементы, минорные БАВ с известным уровнем потребности в них или величиной адекватного суточного потребления, а также про- и пребиотики.

СПП и БАД для спортсменов детского возраста должны отвечать особым повышенным требованиям качества и безопасности, изложенным в технических регламентах Таможенного союза (ЕАЭС), в силу незавершенных процессов роста и развития систем организма, в том числе детоксикационных.

Инновационные отечественные СПП будут востребованы в целостной системе медико-биологического обеспечения детско-юношеского спорта и особенно актуальны в региональном спорте.

⁹ Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к продукции (товарам), подлежащей санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю). Утверждены Решением Комиссии Таможенного союза от 28 мая 2010 г.

¹⁰ Там же.

¹¹ Там же.

¹² Там же.

Сведения об авторах

ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (Москва, Российская Федерация):

Кобелькова Ирина Витальевна (*Irina V. Kobelkova*) – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории антропонутициологии и спортивного питания

E-mail: irinavit66@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1237-5147>

Вржесинская Оксана Александровна (*Oksana A. Vrzhesinskaya*) – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории витаминов и минеральных веществ

E-mail: vr.oksana@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8973-8153>

Тармаева Инна Юрьевна (*Inna Yu. Tarmaeva*) – доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории возрастной нутрициологии, ученый секретарь

E-mail: tarmaeva@ion.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7791-1222>

Литература

- Тутельян В.А., Никитюк Д.Б., Погожева А.В. Теория и практика спортивного питания Москва. ; ДеЛи, 2025. 338 с. ISBN 978-5-6052870-1-8
- Maughan R.J., Burke L.M., Dvorak J., Larson-Meyer D.E., Peeling P., Phillips S.M. et al. IOC consensus statement: Dietary supplements and the high-performance athlete // *Br. J. Sports Med.* 2018. Vol. 52. P. 439–455. DOI: <https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-099027>
- Peeling P., Castell L.M., Derave W., de Hon O., Burke L.M. Sports foods and dietary supplements for optimal function and performance enhancement in track-and-field athletes // *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2019. Vol. 29. P. 198–209. DOI: <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2018-0271>
- Kristensen J.A., Haugen T., Ommundsen Y., Wagner G.G., Elshahry N.A., Elshahry N.A. Supplement usage and doping attitudes in elite youth sports: The mediating role of dietary supplement acceptance // *PLoS ONE*. 2024. Vol. 19. P. e0297078. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0297078>
- Tabata S., Yamasawa F., Torii S., Manabe T., Kamada H., Namba A. et al. Use of nutritional supplements by elite Japanese track and field athletes // *J. Int. Soc. Sports Nutr.* 2020. Vol. 17. P. 38. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12970-020-00370-9>
- Никитюк Д.Б., Кобелькова И.В. Спортивное питание как модель максимальной индивидуализации и реализации интегративной медицины // *Вопросы питания*. 2020. Т. 89. № 4. С. 204–210. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10054>
- Capra M.E., Stanyevic B., Giudice A., Monopoli D., Decarolis N.M., Esposito S., Biasucci G. Nutrition for children and adolescents who practice sport: A narrative review // *Nutrients*. 2024. Vol. 16, N 16. P. 2803. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu16162803>
- Amawi A., Khataybeh B., Al Aqaili R., Ababneh N., Alnimer L., Qoqazeh A. et al. Junior athletes' nutritional demands: a narrative review of consumption and prevalence of eating disorders // *Front Nutr.* 2024. Vol. 11. P. 1390204. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1390204>
- Desbrow B., McCormack J., Burke L.M., Cox G.R., Fallon K., Hislop M. et al. Sports dietitians australia position statement: Sports nutrition for the adolescent athlete // *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2014. Vol. 24. P. 570–584. DOI: <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2014-0031>
- Исследование рынка спортивного питания, 2025. МаксиОма. URL: https://maksioma.ru/shop/neprodovolstvennyye_tovary/rynok_sportivnogo_pitaniia_v_rossii_/?yclid=4230387923760971775 (дата обращения 30.10.2025)
- Отчет об анализе размера, доли и тенденций мирового рынка спортивного питания, 2025. URL: <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-sports-nutrition-market> (дата обращения 30.10.2025)
- Анализ рынка БАД в России – 2026. Показатели и прогнозы. TEBIZ GROUP. URL: https://tebiz.ru/mi/rynok-bad-v-rossii/?utm_source=Yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign=68870130&utm_content=type_search|pl_yandex.ru|grid_4772594266|adid_11513631317|rt_35433795221|ptype_other|pos_1|device_desktop&utm_term=kwi_d_35433795221&yclid=11825644670821859327#1 (дата обращения 30.10.2025)
- Анализ рынка спортивного питания в России в 2020–2024 гг., прогноз на 2025–2029 гг. // *BusinesStat* [Интернет-ресурс]. URL: <https://businesstat.ru> (дата обращения 29.10.2025)
- Анализ рынка спортивного питания в 2024 г. АИПР. <https://aipr-rf.ru/list/zdorovoe-pitanie-mi7/> (дата обращения 29.10.2025)
- Анализ мирового рынка спортивного питания, 2025. Grand View Research, <https://www.marketresearch.com/Grand-View-Research-v4060/>
- Мартынюк Я.П. Спортивное питание как объект маркетинговой деятельности // *Прикладные экономические исследования*. 2024. № S 2. С. 203–210. DOI: <https://doi.org/10.47576/2949-1908.2024.43.20.028>
- Smith J.W., Holmes M.E., McAllister M.J. Nutritional considerations for performance in young athletes // *J. Sports Med (Hindawi Publ Corp)*. 2015. Vol. 2015. P. 734649. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/734649>. Erratum in *J. Sports Med (Hindawi Publ Corp)*. 2017; 2017: 6904048. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/6904048>
- Burke L.M., Castell L.M., Casa D.J., Close G.L., Costa R.J.S., Desbrow B. et al. International Association of Athletics Federations Consensus Statement 2019: Nutrition for Athletics // *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2019. Vol. 29. P. 73–84. DOI: <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2019-0065>
- Radnor J.M., Oliver J.L., Waugh C.M., Myer G.D., Moore I.S., Lloyd R.S. The Influence of Growth and Maturation on Stretch-Shortening Cycle Function in Youth // *Sports Med.* 2018. Vol. 48. P. 57–71. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0785-0>
- Bell M., Ghatora R., Retsidou M.I., Chatzigianni E.E., Klentrou P. Energy expenditure, dietary energy intake, and nutritional supplements in adolescent volleyball athletes versus nonathletic controls // *Nutrients*. 2023. Vol. 15. P. 1788. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu15071788>
- Phillips S.M., Turner A.P., Sanderson M.F., Sproule J., Ward S.A. Beverage carbohydrate concentration influences the intermittent endurance capacity of adolescent team games players during prolonged intermittent running // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2012. Vol. 112. P. 1107–1116. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2065-2>
- Timmons B.W., Bar-Or O., Riddell M.C. Oxidation rate of exogenous carbohydrate during exercise is higher in boys than in men // *J. Appl. Physiol.* 1985. 2003. Vol. 94, N 1. P. 278–284. DOI: <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00140.2002>
- Timmons B.W., Bar-Or O., Riddell M.C. Energy substrate utilization during prolonged exercise with and without carbohydrate intake in preadolescent and adolescent girls // *J. Appl. Physiol.* (1985). 2007. Vol. 103, N 3. P. 995–1000. DOI: <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00018.2007>
- Merkel D.L. Youth sport: Positive and negative impact on young athletes // *Open Access J. Sports Med.* 2013. Vol. 4. P. 151–160. DOI: <https://doi.org/10.2147/OAJSM.S33556>
- World Health Organization and Food and Agriculture Organization of the United Nations and United Nations University. Human Energy Requirements: Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation, Roma 17–24 October 2001. Food and Agriculture Organization of the United Nations; Rome, Italy: 2004. URL: <https://www.fao.org/4/y5686e/y5686e00.htm>
- Hurst P., Schipof-Godart L., Szabo A., Raglin J., Hettinga F., Roelands B. et al. The Placebo and Nocebo effect on sports performance: A systematic review // *Eur. J. Sport Sci.* 2020. Vol. 20. P. 279–292. DOI: <https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1655098>
- Aerenhouts D., Van Cauwenberg J., Poortmans J.R., Hauspie R., Clarys P. Influence of growth rate on nitrogen balance in adolescent sprint athletes // *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2013. Vol. 23, N 4. P. 409–417. DOI: <https://doi.org/10.1123/ijsnem.23.4.409>

28. Кобелькова И.В., Коростелева М.М., Кобелькова М.С. Специализированные пищевые продукты для питания спортсменов на основе белков молочной сыворотки // Спортивная медицина: наука и практика. 2021. Т. 11. № 4. С. 49–56. DOI: <https://doi.org/10.47529/2223-2524.2021.4.6>
29. Phillips S.M., Van Loon L.J. Dietary protein for athletes: from requirements to optimum adaptation // J. Sports Sci. 2011. Vol. 29, Suppl. 1. S29–S38. DOI: <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.619204>
30. Симоненко С.В., Хованова И.В., Лесь Г.М. Продукт для спортивного питания школьников // Молочная промышленность. 2010. № 5. С. 55–56
31. Кобелькова И.В., Коростелева М.М., Никитюк Д.Б., Выборная К.В., Раджаббадиев Р.М., Кобелькова М.С. и др. Разработка специализированного пищевого продукта для профилактики железодефицитной анемии у спортсменок юниоров // Новые технологии в медицине, биологии, фармакологии и экологии: материалы Международной конференции NT + M&Eс 2020. Весенняя сессия. 2021. С. 205–211. DOI: <https://doi.org/10.47501/978-5-6044060-1-4.34>
32. Трушина Э.Н., Мустафина О.К., Аксенов И.В., Красуцкий А.Г., Никитюк Д.Б., Тутельян В.А. Биологически активные вещества – антоцианины как фактор алиментарного восстановления адаптационного потенциала организма после интенсивной физической нагрузки в эксперименте: оценка иммунологических и гематологических показателей адаптации // Вопросы питания. 2023. Т. 92. № 1. С. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-6-15>
33. Красуцкий А.Г., Аксенов И.В. Антоцианины как элемент нутритивной поддержки спортсменов: эффекты и молекулярные механизмы действия // Вопросы питания. 2024. Т. 93. № 3. С. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-3-5-13>
34. Tutelyan V.A., Balakina A.S. Indole-3-Carbinol and different classes of polyphenols in the regulation of the activity of the NrF2/Keap1/are signaling system // Biochemistry (Moscow), Supplement Series B. 2025. Vol. 19, N 2. P. 167–178. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1990750824601139>
35. Трушина Э.Н., Мустафина О.К., Аксенов И.В., Красуцкий А.Г., Тутельян В.А., Никитюк Д.Б. Протективное действие экстракта корня женьшеня на апоптоз миофибрилл и иммунный ответ у крыс после истощающей физической нагрузки. Часть 1. Влияние экстракта корня женьшеня на апоптоз миофибрилл икроножной мышцы крыс // Вопросы питания. 2025. Т. 94, № 1. С. 111–117. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-1-111-117>
36. Трушина Э.Н., Ригер Н.А., Мустафина О.К., Тимонин А.Н., Аксенов И.В., Красуцкий А.Г. и др. Протективное действие экстракта корня женьшеня на апоптоз миофибрилл и иммунный ответ у крыс после истощающей физической нагрузки. Часть 2. Влияние экстракта корня женьшеня на иммунитет и регуляцию энергетического обмена // Вопросы питания. 2025. Т. 94. № 2. С. 61–72. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-2-61-72>
37. Токаев Э.С., Некрасов Е.А., Краснова И.С., Хасанов А.А. Клинические исследования специализированного продукта спортивного питания «Гемоспорт» для регулирования уровня гемоглобина у девочек-подростков, профессионально занимающихся спортом // Спортивная медицина: наука и практика. 2022. Т. 12, № 1. С. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.47529/2223-2524.2022.1.4>
38. Ким В.Н., Хисматуллина И.П., Федосов Ю.Н., Аксенова И.Г., Алехнович А.В. Влияние апифитопродукции на факторы кардиоваскулярного риска, работоспособность и восстановление юных хоккеистов // Прикладная спортивная наука. 2015. № 2. С. 58–67.
39. Ким В.Н., Просекин Г.А., Федосов Ю.Н., Ломазова Е.В., Парастаев С.А. Дегидратация юных спортсменов: методы диагностики, коррекция реологии крови, водно-электролитного и кислотно-щелочного баланса с помощью изотонического специализированного напитка на основе апифитокомпонентов // Спортивная медицина: наука и практика. 2020. Т. 10. № 3. С. 5–17. DOI: <https://doi.org/10.47529/2223-2524.2020.3.5>
40. Просекин Г.А., Ким В.Н., Кривулина Г.Б., Долгова Е.Н., Парастаев С.А. Сочетание повышенной ситуативной тревожности и дисфункции эндотелия у юных спортсменов как условие для спазма микроциркуляции: методы оценки и коррекция с помощью специализированного медового слитка-конфеты // Спортивная медицина: наука и практика. 2020. Т. 10. № 4. С. 43–54. DOI: <https://doi.org/10.47529/2223-2524.2020.4.1>
41. Russell M., Benton D., Kingsley M. Carbohydrate ingestion before and during soccer match play and blood glucose and lactate concentrations // J. Athl. Train. 2014. Vol. 49. P. 447–453. DOI: <https://doi.org/10.4085/1062-6050-49.3.12>
42. Phillips S.M., Turner A.P., Gray S., Sanderson M.F., Sproule J. Ingesting a 6% carbohydrate-electrolyte solution improves endurance capacity, but not sprint performance, during intermittent, high-intensity shuttle running in adolescent team games players aged 12–14 years // Eur. J. Appl. Physiol. 2010. Vol. 109. P. 811–821. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1404-z>
43. Phillips S.M., Turner A.P., Sanderson M.F., Sproule J., Ward S.A. Carbohydrate gel ingestion significantly improves the intermittent endurance capacity, but not sprint performance, of adolescent team games players during a simulated team games protocol // Eur. J. Appl. Physiol. 2012. Vol. 112. P. 1133–1141. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2067-0>
44. Cunha V.C.R., Aoki M.S., Zourdos M.C., Gomes R.V., Barbosa W.P., Massa M. et al. Sodium citrate supplementation enhances tennis skill performance: A crossover, placebo-controlled, double blind study // J. Int. Soc. Sports Nutr. 2019. Vol. 16. P. 32. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12970-019-0297-4>
45. Lopez-Samanes A., Gomez Parra A., Moreno-Perez V., Courel-Ibanez J. Does acute beetroot juice supplementation improve neuromuscular performance and match activity in young basketball players? A randomized, placebo-controlled study // Nutrients. 2020. Vol. 12. P. 188. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu12010188>
46. Marjerrison A.D., Lee J.D., Mahon A.D. Preexercise carbohydrate consumption and repeated anaerobic performance in pre- and early-pubertal boys // Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab. 2007. Vol. 17, N 2. P. 140–151. DOI: <https://doi.org/10.1123/ijsnem.17.2.140>
47. Timmons B.W., Bar-Or O. RPE during prolonged cycling with and without carbohydrate ingestion in boys and men // Med. Sci. Sports Exerc. 2003. Vol. 35, N 11. P. 1901–1907. DOI: <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000093752.46408.AF>
48. Timmons B.W., Bar-Or O., Riddell M.C. Influence of age and pubertal status on substrate utilization during exercise with and without carbohydrate intake in healthy boys // Appl. Physiol. Nutr. Metab. 2007. Vol. 32. P. 416–425. DOI: <https://doi.org/10.1139/H07-004>
49. Stough C., Scholey A., Gentile-Rapinett G., Schmidt J., Goh A., Wesnes K. et al. An evaluation of the cognitive effects of malt extract and sucrose in school-aged Malaysian Children // Bioact. Compd. Health Dis. 2020. Vol. 3, N 10. P. 179–193. DOI: <https://doi.org/10.31989/bchd.v3i10.754>
50. Carvalho P., Oliveira B., Barros R., Padrão P., Moreira P., Teixeira V.H. Impact of fluid restriction and ad libitum water intake or an 8% carbohydrate-electrolyte beverage on skill performance of elite adolescent basketball players // Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab. 2011. Vol. 21, N 3. P. 214–221. DOI: <https://doi.org/10.1123/ijsnem.21.3.214>
51. Heidorn C.E., Dykstra B.J., Conner C.A., Mahon A.D. Carbohydrate drink use during 30 minutes of variable-intensity exercise has no effect on exercise performance in premenarchal girls // Pediatr. Exerc. Sci. 2021. Vol. 33, N 2. P. 65–69. DOI: <https://doi.org/10.1123/pes.2020-0050>
52. Guth L.M., Rogowski M.P., Guilkey J.P., Mahon A.D. Carbohydrate consumption and variable-intensity exercise responses in boys and men // Eur. J. Appl. Physiol. 2019. Vol. 119. P. 1019–1027. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04091-z>
53. Bender D., Townsend J.R., Vantrease W.C., Marshall A.C., Henry R.N., Heffington S.H. et al. Acute beetroot juice administration improves peak isometric force production in adolescent males // Appl. Physiol. Nutr. Metab. 2018. Vol. 43. P. 816–821. DOI: <https://doi.org/10.1139/apnm-2018-0050>
54. Lee J.D., Sterrett L.E., Guth L.M., Konopka A.R., Mahon A.D. The effect of pre-exercise carbohydrate supplementation on anaerobic exercise performance in adolescent males // Pediatr. Exerc. Sci. 2011. Vol. 23. P. 344–354. DOI: <https://doi.org/10.1123/pes.23.3.344>
55. Вржесинская О.А., Переверзева О.Г., Бекетова Н.А., Исаева В.А., Харитончик Л.А., Коденцова В.М., и др. Обеспеченность витаминами подростков–баскетболистов // Вопросы питания. 2004. Т. 73, № 2. С. 22–24.
56. Спиричев В.Б., Вржесинская О.А., Коденцова В.М., Бекетова Н.А., Переверзева О.Г., Кошелева О.В., и др. Обеспеченность витаминами детей среднего школьного возраста, занимающихся плаванием, и ее коррекция // Вопросы детской диетологии. 2011. Т. 9, № 4. С. 39–45.
57. Столярова С.А., Окороков П.Л., Зябкин И.В., Исаева Е.П. Оценка обеспеченности витамином D юных спортсменов // Педиатрия им. Г.Н. Сперанского. 2023. Т. 102, № 5. С. 216–221. DOI: <https://doi.org/10.24110/0031-403X-2023-102-5-216-221>
58. Трушина Э.Н., Ригер Н.А., Мустафина О.К., Тимонин А.Н., Солнцева Т.Н., Зилова И.С. и др. Мультиштаммовый пробиотик в комплексе с пищевыми волокнами – эффективный фактор нутритивной поддержки иммунитета у спортсменов // Вопросы питания. 2024. Т. 93, № 2. С. 19–30. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-2-19-30>

References

- Tutelyan V.A., Nikityuk D.B., Pogozheva A.V. Theory and practice of sports nutrition. Moscow: Delhi, 2025: 338 p. ISBN 978-5-6052870-1-8 (in Russian)
- Maughan R.J., Burke L.M., Dvorak J., Larson-Meyer D.E., Peeling P., Phillips S.M., et al. IOC consensus statement: Dietary supplements and the high-performance athlete. *Br J Sports Med.* 2018; 52: 439–455. DOI: <https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-099027>
- Peeling P., Castell L.M., Derave W., de Hon O., Burke L.M. Sports foods and dietary supplements for optimal function and performance enhancement in track-and-field athletes. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2019; 29: 198–209. DOI: <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2018-0271>
- Kristensen J.A., Haugen T., Ommundsen Y., Wagner G.G., Elshahry N.A., Elshahry N.A. Supplement usage and doping attitudes in elite youth sports: The mediating role of dietary supplement acceptance. *PLoS ONE.* 2024; 19: e0297078. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0297078>
- Tabata S., Yamasawa F., Torii S., Manabe T., Kamada H., Namba A., et al. Use of nutritional supplements by elite Japanese track and field athletes. *J Int Soc Sports Nutr.* 2020; 17: 38. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12970-020-00370-9>
- Nikityuk D.B., Kobelkova I.V. Sports nutrition as a model of maximum individualization and implementation of integrative medicine. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2020; 89 (4): 204–10. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10054> (in Russian)
- Capra M.E., Stanyevic B., Giudice A., Monopoli D., Decarolis N.M., Esposito S., Biasucci G. Nutrition for children and adolescents who practice sport: A narrative review. *Nutrients.* 2024; 16 (16): 2803. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu16162803>
- Amawi A., Khataybeh B., Al Aqaili R., Ababneh N., Alnimer L., Qoqazeh A., et al. Junior athletes' nutritional demands: a narrative review of consumption and prevalence of eating disorders. *Front Nutr.* 2024; 11: 1390204. DOI: 10.3389/fnut.2024.1390204
- Desbrow B., McCormack J., Burke L.M., Cox G.R., Fallon K., Hislop M., et al. Sports dietitians australia position statement: Sports nutrition for the adolescent athlete. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2014; 24: 570–84. DOI: <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2014-0031>
- Sports Nutrition Market Research, 2025 MaxiOma https://maksima.ru/shop/neprodovolstvennyye_tovary/rynok_sportivnogo_pitaniia_v_rossii_/?yclid=4230387923760971775 (date of access 30.10.2025) (in Russian)
- Report on the analysis of the size, share and trends of the global sports nutrition market, 2025 <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-sports-nutrition-market> (date of access 30.10.2025) (in Russian)
- Analysis of the dietary supplements market in Russia – 2026. Indicators and forecasts. TEBIZ GROUP. https://tebiz.ru/mi/rynok-bad-v-rossii/?utm_source=Yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign=68870130&utm_content=type_search|pl_yandex.rulgrid_4772594266|adid_1151363131|rt_35433795221|ptype_other|pos_1|device_desktop&utm_term=kwid_35433795221&yclid=11825644670821859327#1 (date of access 30.10.2025) (in Russian)
- Analysis of the sports nutrition market in Russia in 2020–2024, forecast for 2025–2029 *BusinesStat* (date of access 29.10.2025) (in Russian)
- Analysis of the sports nutrition market in 2024 AIPR. <https://aipr-rf.ru/list/zdorovie-pitanie-mi7/> (date of access 29.10.2025) (in Russian)
- Analysis of the global sports nutrition market, 2025. Grand View Research, <https://www.marketresearch.com/Grand-View-Research-v4060/>
- Martynyuk Ya.P. Sports nutrition as an object of marketing activity. *Applied economic research.* 2024; (S 2): 203–10. DOI: <https://doi.org/10.47576/2949-1908.2024.43.20.028> (in Russian)
- Smith J.W., Holmes M.E., McAllister M.J. Nutritional considerations for performance in young athletes. *J. Sports Med.* 2015; 2015: 734649. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/734649> Erratum in *J. Sports Med (Hindawi Publ Corp)*. 2017; 2017: 6904048. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/6904048>
- Burke L.M., Castell L.M., Casa D.J., Close G.L., Costa R.J.S., Desbrow B., et al. International Association of Athletics Federations Consensus Statement 2019: Nutrition for Athletics. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 2019; 29: 73–84. DOI: <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2019-0065>
- Radnor J.M., Oliver J.L., Waugh C.M., Myer G.D., Moore I.S., Lloyd R.S. The Influence of Growth and Maturation on Stretch-Shortening Cycle Function in Youth. *Sports Med.* 2018; 48: 57–71. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0785-0>
- Bell M., Ghatara R., Retsidou M.I., Chatzigianni E.E., Klentrou P. Energy expenditure, dietary energy intake, and nutritional supplements in adolescent volleyball athletes versus nonathletic controls. *Nutrients.* 2023; 15: 1788. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu15071788>
- Phillips S.M., Turner A.P., Sanderson M.F., Sproule J., Ward S.A. Beverage carbohydrate concentration influences the intermittent endurance capacity of adolescent team games players during prolonged intermittent running. *Eur J Appl Physiol.* 2012; 112: 1107–16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2065-2>
- Timmons B.W., Bar-Or O., Riddell M.C. Oxidation rate of exogenous carbohydrate during exercise is higher in boys than in men. *J Appl Physiol* (1985). 2003; 94 (1): 278–84. DOI: <https://doi.org/10.1152/jap-physiol.00140.2002>
- Timmons B.W., Bar-Or O., Riddell M.C. Energy substrate utilization during prolonged exercise with and without carbohydrate intake in pre-adolescent and adolescent girls. *J Appl Physiol* (1985). 2007; 103 (3): 995–1000. DOI: <https://doi.org/10.1152/jap-physiol.00018.2007>
- Merkel D.L. Youth sport: Positive and negative impact on young athletes. *Open Access J Sports Med.* 2013; 4: 151–60. DOI: <https://doi.org/10.2147/OAJSM.S33556>
- World Health Organization and Food and Agriculture Organization of the United Nations and United Nations University. Human Energy Requirements: Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation, Roma 17–24 October 2001. Food and Agriculture Organization of the United Nations; Rome, Italy: 2004. Available online: <https://www.fao.org/4/y5686e/y5686e00.htm>
- Hurst P., Schipof-Godart L., Szabo A., Raglin J., Hettinga F., Roelands B., et al. The placebo and nocebo effect on sports performance: A systematic review. *Eur J Sport Sci.* 2020; 20: 279–92. DOI: <https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1655098>
- Aerenhouts D., Van Cauwenberg J., Poortmans J.R., Hauspie R., Clarys P. Influence of growth rate on nitrogen balance in adolescent sprint athletes. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 2013; 23(4): 409–17. DOI: <https://doi.org/10.1123/ijsnem.23.4.409>
- Kobelkova I.V., Korosteleva M.M., Kobelkova M.S. Specialized food products for the nutrition of athletes based on whey proteins. *Sports medicine: research and practice.* 2021; 11 (4): 49–56. DOI: <https://doi.org/10.47529/2223-2524.2021.4.6> (in Russian)
- Phillips S.M., Van Loon L.J. Dietary protein for athletes: from requirements to optimum adaptation. *J Sports Sci.* 2011; 29 (S1): 29–38. DOI: <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.619204>
- Simonenko S.V., Khovanova I.V., Les G.M. A product for sports nutrition of schoolchildren. *Dairy industry.* 2010; (5): 55–6. (in Russian)
- Kobelkova I.V., Korosteleva M.M., Nikityuk D.B., Vybornaya K.V., Radjabkadiyev R.M., Kobelkova M.S., et al. Development of a specialized food product for the prevention of iron deficiency anemia in female juniors. *New Technologies in Medicine, Biology, Pharmacology, and Ecology: Proceedings of the International Conference NT + M&Ec 2020. Spring Session.* 2021: 205–11. DOI: <https://doi.org/10.47501/978-5-6044060-1-4.34> (in Russian)
- Trushina E.N., Mustafina O.K., Aksenov I.V., Krasutsky A.G., Nikityuk D.B., Tutelyan V.A. Bioactive compounds anthocyanins as a factor in the nutritional recovery of the body's adaptive potential after intense physical activity in the experiment: assessment of immunological and hematological indicators of adaptation. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2023; 92 (1): 6–15. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-6-15> (in Russian)
- Krasutsky A.G., Aksenov I.V. Anthocyanins as an element of nutritional support for athletes: effects and molecular mechanisms of action. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2024; 93 (3): 5–13. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-3-5-13> (in Russian)
- Tutelyan V.A., Balakina A.S. Indole-3-carbinol and different classes of polyphenols in the regulation of the activity of the nrf2/keap1/are signaling system. *Biochemistry (Moscow), Supplement Series B: Biomedical Chemistry.* 2025; 19 (2): 167–78. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1990750824601139>
- Trushina E.N., Mustafina O.K., Aksenov I.V., Krasutsky A.G., Tutelyan V.A., Nikityuk D.B. Protective action of ginseng root extract on myofibril apoptosis and immune response in rats after exhausting physical exercise. Part I. Effect of ginseng root extract on myofibril apoptosis in rats' gastrocnemius muscle. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2025; 94 (1): 111–7. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-1-111-117> (in Russian)
- Trushina E.N., Rieger N.A., Mustafina O.K., Timonin A.N., Aksenov I.V., Krasutsky A.G., et al. Protective action of ginseng root extract on myofibril apoptosis and immune response in rats after exhausting physical exercise. Part II. Effect of ginseng root extract on immunity and regulation of energy metabolism. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2025; 94 (2): 61–72. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2025-94-2-61-72> (in Russian)

37. Tokaev E.S., Nekrasov E.A., Krasnova I.S., Khasanov A.A. Clinical studies of a specialized sports nutrition product «Hemosport» for regulating hemoglobin levels in adolescent girls who are professionally involved in sports. *Sports Medicine: Science and Practice*. 2022; 12 (1): 47–55. DOI: <https://doi.org/10.47529/2223-2524.2022.1.4> (in Russian)
38. Kim V.N., Khismatullina I.P., Fedosov Yu.N., Aksenova I.G., Alekhovich A.V. The influence of apiphyte products on cardiovascular risk factors, performance and recovery of young hockey players. *Applied Sports Science*. 2015; (2): 58–67. (in Russian)
39. Kim V.N., Prosekin G.A., Fedosov Yu.N., Lomazova E.V., Parastayev S.A. Dehydration of young athletes: diagnostic methods, correction of blood rheology, water-electrolyte and acid-base balance using an isotonic specialized drink based on apiphyte components. *Sports medicine: science and practice*. 2020; 10 (3): 5–17. DOI: <https://doi.org/10.47529/2223-2524.2020.3.5> (in Russian)
40. Prosekin G.A., Kim V.N., Krivulina G.B., Dolgova E.N., Parastayev S.A. Combination of increased situational anxiety and endothelial dysfunction in young athletes as a condition for microcirculation spasm: assessment methods and correction using a specialized honey candy bar. *Sports Medicine: Science and Practice*. 2020; 10 (4): 43–54. DOI: <https://doi.org/10.47529/2223-2524.2020.4.1> (in Russian)
41. Russell M., Benton D., Kingsley M. Carbohydrate ingestion before and during soccer match play and blood glucose and lactate concentrations. *J Athl Train*. 2014; 49: 447–53. DOI: <https://doi.org/10.4085/1062-6050-49.3.12>
42. Phillips S.M., Turner A.P., Gray S., Sanderson M.F., Sproule J. Ingesting a 6% carbohydrate-electrolyte solution improves endurance capacity, but not sprint performance, during intermittent, high-intensity shuttle running in adolescent team games players aged 12–14 years. *Eur J Appl Physiol*. 2010; 109: 811–21. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1404-z>
43. Phillips S.M., Turner A.P., Sanderson M.F., Sproule J., Ward S.A. Carbohydrate gel ingestion significantly improves the intermittent endurance capacity, but not sprint performance, of adolescent team games players during a simulated team games protocol. *Eur J Appl Physiol*. 2012; 112: 1133–41. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2067-0>
44. Cunha V.C.R., Aoki M.S., Zourdos M.C., Gomes R.V., Barbosa W.P., Massa M., et al. Sodium citrate supplementation enhances tennis skill performance: A crossover, placebo-controlled, double blind study. *J Int Soc Sports Nutr*. 2019; 16: 32. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12970-019-0297-4>
45. Lopez-Samanes A., Gomez Parra A., Moreno-Perez V., Courel-Ibanez J. Does acute beetroot juice supplementation improve neuromuscular performance and match activity in young basketball players? A randomized, placebo-controlled study. *Nutrients*. 2020; 12: 188. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu12010188>
46. Marjerrison A.D., Lee J.D., Mahon A.D. Preexercise carbohydrate consumption and repeated anaerobic performance in pre- and early-pubertal boys. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab*. 2007; 17 (2): 140–51. DOI: <https://doi.org/10.1123/ijnsnem.17.2.140>
47. Timmons B.W., Bar-Or O. RPE during prolonged cycling with and without carbohydrate ingestion in boys and men. *Med. Sci. Sports Exerc*. 2003; 35(11): 1901–1907. DOI: <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000093752.46408.AF>
48. Timmons B.W., Bar-Or O., Riddell M.C. Influence of age and pubertal status on substrate utilization during exercise with and without carbohydrate intake in healthy boys. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2007; 32: 416–25. DOI: <https://doi.org/10.1139/H07-004>
49. Stough C., Scholey A., Gentile-Rapinett G., Schmidt J., Goh A., Wesnes K., et al. An evaluation of the cognitive effects of malt extract and sucrose in school-aged Malaysian Children. *Bioact. Compd. Health Dis*. 2020; 3 (10): 179–93. DOI: <https://doi.org/10.31989/bchd.v3i10.754>
50. Carvalho P., Oliveira B., Barros R., Padrão P., Moreira P., Teixeira V.H. Impact of fluid restriction and ad libitum water intake or an 8% carbohydrate-electrolyte beverage on skill performance of elite adolescent basketball players. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. 2011; 21 (3): 214–21. DOI: <https://doi.org/10.1123/ijnsnem.21.3.214>
51. Heidorn C.E., Dykstra B.J., Conner C.A., Mahon A.D. Carbohydrate drink use during 30 minutes of variable-intensity exercise has no effect on exercise performance in premenarchal girls. *Pediatr. Exerc. Sci*. 2021; 33 (2): 65–9. DOI: <https://doi.org/10.1123/pes.2020-0050>
52. Guth L.M., Rogowski M.P., Guilkey J.P., Mahon A.D. Carbohydrate consumption and variable-intensity exercise responses in boys and men. *Eur J Appl Physiol*. 2019; 119: 1019–27. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04091-z>
53. Bender D., Townsend J.R., Vantrease W.C., Marshall A.C., Henry R.N., Heffington S.H., et al. Acute beetroot juice administration improves peak isometric force production in adolescent males. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2018; 43: 816–21. DOI: <https://doi.org/10.1139/apnm-2018-0050>
54. Lee J.D., Sterrett L.E., Guth L.M., Konopka A.R., Mahon A.D. The effect of pre-exercise carbohydrate supplementation on anaerobic exercise performance in adolescent males. *Pediatr Exerc Sci*. 2011; 23: 344–54. DOI: <https://doi.org/10.1123/pes.23.3.344>
55. Vrzhesinskaya O.A., Pereverzeva O.G., Beketova N.A., Isaeva V.A., Kharitonchik L.A., Kodentsova V.M., et al. Vitamin supplementation of teenage basketball players. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2004; 73 (2): 22–4. (in Russian)
56. Spirichev V.B., Vrzhesinskaya O.A., Kodentsova V.M., Beketova N.A., Pereverzeva O.G., Kosheleva O.V., et al. Vitamin provision in middle school-age children going in for swimming and its correction. *Pediatric Nutrition*. 2011; 9 (4): 39–45. (in Russian)
57. Stolyarova S.A., Okorokov P.L., Zyabkin I.V., Isaeva E.P. Assessment of vitamin D sufficiency in young athletes. *Pediatrics named after G.N. Speransky*. 2023; 102 (5): 216–21. DOI: <https://doi.org/10.24110/0031-403X-2023-102-5-216-221> (in Russian)
58. Trushina E.N., Rieger N.A., Mustafina O.K., Timonin A.N., Solntseva T.N., Zilova I.S., et al. A multi-strain probiotic in combination with dietary fiber is an effective factor in nutritional support of immunity in athletes. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2024; 93 (2): 19–30. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-88>

Резолюция XIX Международного конгресса диетологов и нутрициологов «Оптимальное питание – основа продолжительной и активной жизни», посвященного 95-летию ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»

17–18 ноября 2025 г. состоялся очередной XIX Международный конгресс диетологов и нутрициологов «Оптимальное питание – основа продолжительной и активной жизни», посвященный 95-летию ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии».

Символично, что Конгресс прошел в год 80-летия Великой Победы, что ознаменовало славные вехи в истории страны, преемственность традиций и передачу опыта и знаний через поколения. ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» – один из старейших научно-исследовательских центров страны, направленных на разработку вопросов нутрициологии. В основе этого Центра находится Институт питания, 95-летие которого мы отмечаем. Многолетняя история Института связана со становлением и развитием наук о питании – нутрициологии, физиологии и биохимии питания, диетологии, гигиены питания.

XIX Международный конгресс диетологов и нутрициологов «Оптимальное питание – основа продолжительной и активной жизни» стал масштабным мультидисциплинарным научно-практическим мероприятием, в рамках которого были представлены результаты фундаментальных исследований в нутрициологии и диетологии, новейшие достижения в области оптимизации питания населения России, профилактики и лечения алиментарно-зависимых заболеваний, создания новых специализированных пищевых продуктов, качества и безопасности пищи, продвижения идей здорового питания и здорового образа жизни.

Организаторы Конгресса: Минобрнауки России, РАН, Минздрав России, Роспотребнадзор, ФМБА России, ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», РосДНП (Общероссийская общественная организация «Российская организация диетологов, нутрициологов и специалистов пищевой индустрии»). Конгресс проведен при поддержке Комитета по аграрно-продовольственной политике и природопользованию Совета Федерации Федерального Собрания Российской Федерации, Комитета по науке и высшему образованию и Комитета по охране здоровья Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации.

В работе Конгресса приняли участие более 3000 человек из 43 регионов России, в том числе представители федеральных органов исполнительной власти, академической и вузовской науки, врачи различных специальностей, работники центров медицинской профилактики и здоровья, специалисты пищевой индустрии;

иностранные гости Конгресса – ученые и специалисты из зарубежных стран (Республика Беларусь, Республика Казахстан, Кыргызская Республика, Республика Таджикистан, Туркменистан, Республика Узбекистан, Китайская Народная Республика, Социалистическая Республика Вьетнам, Республика Индия и др.).

В адрес участников Конгресса поступили приветствия от заместителя Председателя Правительства РФ Т.А. Голиковой, заместителя Председателя Совета Федерации Федерального Собрания Российской Федерации И.Ю. Святенко, заместителя Председателя Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации И.А. Яровой, полномочного представителя Президента РФ в Центральном федеральном округе И.О. Щеголева, министра спорта РФ М.В. Дегтярева, президента РАН, академика РАН Г.Я. Красникова и других официальных лиц.

В рамках работы Конгресса проведены 2 пленарных и 13 секционных заседаний, 23 симпозиума с участием ведущих российских и зарубежных экспертов по вопросам питания из РАН, профильных министерств, общественных организаций и отраслевых союзов, представителей бизнес-сообщества, биотехнологических предприятий и пищевой индустрии.

Основные вопросы, рассмотренные на Конгрессе: оптимизация питания различных групп населения России для реализации национальных приоритетов России; инновации в области нутрициологии, нутригеномики и нутриметабомики; роль диетологии и нутрициологии в профилактике и лечении социально значимых алиментарно-зависимых заболеваний; стратегии снижения потребления критически значимых пищевых веществ; оптимизация питания как основа активного долголетия; мультидисциплинарные подходы к профилактике ожирения; диетологические аспекты реабилитации в условиях чрезвычайных ситуаций; энтеральное питание пациентов после хирургических вмешательств; проблемы организации лечебного питания в медицинских учреждениях; цифровизация в диетологии; достижения спортивной антропонутициологии как интегративного подхода к оптимизации питания спортсменов; проблемы питания детей от рождения до совершеннолетия; роль питания в обеспечении женского здоровья, нутритивная поддержка беременных и кормящих женщин; микробиом кишечника как неотъемлемый компонент современной концепции здоровья; вопросы организации школьного

питания; арктическое питание; инновационные специализированные пищевые продукты; качество и безопасность пищевой продукции: совершенствование нормативно-методической базы контроля, в том числе в рамках международного сотрудничества; оценка безопасности новых источников пищи; актуальные вопросы регулирования в сфере обеспечения безопасности пищевой продукции в ЕАЭС; национальные приоритеты здорового питания; современные агро- и биотехнологии для будущего пищевой индустрии; образовательные программы в области здорового питания.

В ходе Конгресса были сформулированы критически важные задачи в сфере здоровьесбережения населения, к числу которых относятся преодоление роста неинфекционных алиментарно-зависимых заболеваний, ликвидация имеющегося дефицита микронутриентов и минорных биологически активных веществ, улучшение пищевого статуса населения.

При обсуждении современных достижений фундаментальной нутрициологии были всесторонне рассмотрены различные аспекты нутритивной эпигенетики, влияния обмена веществ на клеточные и гуморальные механизмы иммунитета, роль биологически активных веществ пищи как модулирующих факторов продления биологического возраста и обеспечения активного долголетия.

Впервые были предложены способы нутритивной поддержки раненых и возможности реабилитации пациентов в условиях чрезвычайных ситуаций; обсуждались перспективные технологии организации космического питания. Были представлены новые подходы к коррекции рационов пациентов с заболеваниями органов пищеварения с использованием инновационных специализированных диетических (лечебных и профилактических) пищевых продуктов.

Проведены заседания школы диетологов и школы педиатров, круглые столы, посвященные актуальным вопросам диетологии в педиатрической практике, диетотерапии социально значимых, в том числе алиментарно-зависимых заболеваний, профилактике ожирения и образовательным программам в области здорового питания, развитию индустрии детского питания. Проведено заседание профильной комиссии Экспертного совета по здравоохранению по специальности «Диетология» Минздрава России, в котором приняли участие более 60 главных внештатных специалистов-диетологов федеральных округов и субъектов РФ, представители ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» и Национальной ассоциации клинического питания.

Особое внимание участников Конгресса привлекло секционное заседание «Диетология, биотехнология, качество и безопасность пищевой продукции: международное сотрудничество научного сообщества и производителей», в котором наряду с российскими учеными приняли участие специалисты из Республики Индии, Китайской Народной Республики, Кыргызской Республики и других стран – членов СНГ.

На площадке Конгресса состоялось подписание Меморандума о сотрудничестве между ФГБУН «ФИЦ питания

и биотехнологии», Российско-Таджикским деловым советом, Ассоциацией педиатров и Центром развития квалификации медицинских работников Республики Узбекистан. Основные направления сотрудничества: проведение совместных научных исследований; организация совместных научных конференций, симпозиумов и научно-практических семинаров; академические обмены; совместная разработка и реализация программ повышения квалификации и переподготовки для специалистов в области гигиены питания, диетологии, гастроэнтерологии и эндокринологии.

Активное участие в работе Конгресса приняли молодые ученые. С устными докладами выступили научные сотрудники, аспиранты и участники научных проектов, поддержанных Российским научным фондом. На конкурс научных работ в форме постерных докладов поступило более 50 работ из Москвы, Санкт-Петербурга, Минска (Республика Беларусь), Харбина и Чанчунь (КНР), Астрахани, Барнаула, Владивостока, Ростова-на-Дону и др.

Высоким спросом среди участников Конгресса пользовался стенд консультативно-диагностического центра «Здоровое и спортивное питание» ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии».

Решением Координационного совета по развитию непрерывного медицинского образования Минздрава России Конгрессу присвоены кредитные образовательные единицы по 19 медицинским специальностям.

Работа Конгресса широко освещалась средствами массовой информации. Анонсы мероприятия были опубликованы в печатных и электронных профильных средствах массовой информации, освещающих вопросы медицины и пищевой индустрии. На площадке Конгресса работали журналисты федеральных газет и журналов, центральных телеканалов.

С успехом прошла выставка производителей специализированной пищевой продукции и биологически активных добавок к пище. Ведущие отечественные производители представили новые технологии и образцы инновационной пищевой продукции.

Решения Конгресса:

1. Признать XIX Международный конгресс диетологов и нутрициологов «Оптимальное питание – основа продолжительной и активной жизни», посвященный 95-летию ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», **значимым событием в научной и образовательной жизни страны, способствующим реализации государственной политики Российской Федерации в области оптимизации питания населения.** Отметить высокую научную и организационную значимость Конгресса как ключевой площадки для обмена опытом, презентации научных достижений и консолидации профессионального сообщества диетологов, нутрициологов, кардиологов, гастроэнтерологов, педиатров, эндокринологов, врачей спортивной медицины, а также экспертов в области производства специализированного и лечебного питания, изготовителей пищевой продукции массового потребления, организаторов здравоохранения, представителей органов законодательной и исполнительной власти.

2. Особое внимание уделить межведомственному взаимодействию с участием Минобрнауки России, Минздрава России, Минпросвещения России, Роспотребнадзора, ФМБА России совместно с ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» и иными профильными научно-исследовательскими центрами для выполнения следующих научно-практических и организационных задач:

- оценка **состояния фактического питания** населения РФ, разработка адресных региональных программ и рекомендаций для формирования пищевого поведения и обеспечения здорового питания всех возрастных групп населения на региональном уровне; внедрение инновационных диагностических технологий, включая визуализационные, метаболомические, иммунологические, для расширенной оценки пищевого статуса у пациентов разного возраста с избыточной массой тела, ожирением и ассоциированными с ними заболеваниями и патологическими состояниями;
- формирование единого подхода к **созданию нового класса пищевых продуктов** с заданным химическим составом, максимально сбалансированных по пищевой и биологической ценности, направленных на восполнение дефицитов, снижение калорийности и увеличение пищевой плотности рациона, как при индивидуальном потреблении, так и в организованных коллективах;
- разработка программ по **оптимизации питания женщин репродуктивного возраста** в качестве основы ранней профилактики алиментарно-зависимых состояний детского возраста, снижения риска недоношенности; создание научно обоснованной **системы поддержки грудного вскармливания** как одного из приоритетных направлений в борьбе с детским ожирением;
- создание инновационных стратегий **персонализированной диетотерапии в рамках медицины здорового долголетия**: изучение взаимосвязи питания, диетологических вмешательств (сенолитиков) и биомаркеров старения, процессов старения клеток и его предотвращения, особенностей эпигенетических механизмов, генетических и метаболических профилей.

3. Признать необходимым уделить особое внимание решению задач **обеспечения витаминно-минеральными комплексами мирных жителей и разработке специальных рационов для военнослужащих, находящихся в зоне проведения специальной военной операции.**

4. Поддерживать дальнейшее **развитие спортивной антропонутириологии** как интегративного подхода к оптимизации питания и пищевого статуса для повышения адаптационного потенциала и профессиональной работоспособности спортсменов.

5. Подчеркнуть важность и перспективность направлений фундаментальных и прикладных исследований:

- разработка новых экспериментальных моделей для оценки эффективности **макро- и микронутриентов, минорных биологически активных веществ**, формирующих отличительные признаки новых видов специализированной пищевой продукции;

- поиск **новых источников полноценного белка** для использования в питании человека; разработка новых подходов к оценке пищевой ценности и безопасности **нетрадиционных источников пищи**; научное обоснование требований к новым поколениям генетически модифицированных микроорганизмов для пищевой промышленности, разработка методов контроля, адекватных современным технологиям конструирования генетически модифицированных микроорганизмов;

- совершенствование **системы обеспечения безопасности пищевой продукции** по направлениям: выявление новых видов природных и антропогенных загрязнителей пищевой продукции, нормирование пищевых добавок, обоснования регламентов их содержания в пищевой продукции; прогнозирование появления новых видов возбудителей заболеваний, передающихся с пищей, оценка риска реальной контаминации пищевых продуктов этими микроорганизмами; разработка высокочувствительных и селективных аналитических методов обнаружения, идентификации и количественного определения новых и потенциально опасных загрязнителей пищевой продукции природного и антропогенного происхождения.

6. Поддерживать выполнение мероприятий по **возрождению отечественного биотехнологического производства пищевых ингредиентов** (витаминов, белка, биологически активных соединений) и созданию технологической базы производства ингредиентов для детского питания – смесей для искусственного вскармливания, лечебного питания, в том числе для детей с орфанной патологией, энтерального питания.

7. Способствовать развитию системы федеральных и региональных **образовательных программ** и формированию **единой методической платформы** для повышения уровня образования населения в вопросах здоровья, культуры питания, приверженности здоровому образу жизни, трансляции результатов научных исследований в области нутрициологии и пищевой биотехнологии в практическое здравоохранение, агропромышленный комплекс и образовательную деятельность.

8. Поддерживать развитие и внедрение **технологий искусственного интеллекта** в разные аспекты науки о питании.

9. Развивать **международное сотрудничество**, укреплять связи с научными и образовательными центрами стран СНГ, дружественных стран дальнего и ближнего зарубежья, в том числе в формате совместных конференций, публикаций и академических обменов.

10. Информацию о работе Конгресса и его решениях опубликовать в журнале «Вопросы питания», **информировать профессиональное сообщество** путем представления соответствующих материалов, включая резолюцию, на официальных сайтах Конгресса, ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» и РосДНП.

11. Провести следующий Конгресс, посвященный наиболее актуальным фундаментальным и прикладным проблемам в области нутрициологии, диетологии и здоровьесбережения населения России, в **IV квартале 2027 г.**



Анна Юрьевна Попова (к юбилею)

18 октября 2025 г. исполнилось 65 лет со дня рождения Анны Юрьевны Поповой – авторитетного ученого, доктора медицинских наук, профессора, руководителя Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главного государственного санитарного врача РФ, заведующего кафедрой организации санитарно-эпидемиологической службы ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, члена редакционной коллегии журнала «Вопросы питания».

Профессиональный путь Анны Юрьевны как организатора санитарно-эпидемиологической службы начался в 2008 г., когда она была назначена на должность руководителя Управления Роспотребнадзора, с 2011 г. она заместитель руководителя, а с октября 2013 г. – руководитель Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главный государственный санитарный врач РФ.

А.Ю. Попова хорошо известна и как видный гигиенист-практик и крупный ученый в области теоретических основ санитарно-эпидемиологической безопасности населения.

Широкое общественное признание и глубокое уважение получила работа Анны Юрьевны по ликвидации вспышек множества опасных инфекционных заболеваний в России и в других странах, включая новую коронавирусную инфекцию. Под ее руководством создан и успешно действует «Санитарный щит» – система противодействия инфекциям, обеспечивающая сохранение здоровья населения, а также защиту от возможных инфекционных угроз в будущем, которая включает совершенствование лабораторной диагностики, формирование санитарной грамотности населения с использованием лучших традиций санитарно-просветительской работы и новей-

ших цифровых технологий, подготовку квалифицированных кадров в области инфекционных заболеваний.

Ее научные труды включают проблемы оценки рисков от загрязнения объектов окружающей среды, например пищевой продукции, стойкими органическими загрязнителями, в том числе полихлорированными бифенилами. Раскрытые в ее работах вопросы влияния загрязнения окружающей среды полихлорированными бифенилами на противоинфекционную резистентность и поствакцинальный иммунитет продолжают сохранять высокую научную и практическую актуальность и в настоящее время. Под ее руководством проводится разработка и реализация системы риск-ориентированного надзора за безопасностью потребительской продукции. Большое внимание А.Ю. Попова уделяет вопросам реализации национальных проектов, в том числе «Демография» и «Продолжительная и активная жизнь», включающих развитие таких важнейших направлений, как мониторинг состояния питания населения, а также качества и безопасности пищевой продукции.

А.Ю. Попова является автором свыше 400 научных трудов, их отличает высокая востребованность, а разработанные под ее руководством и при непосредственном участии нормативно-методические документы вносят существенный вклад в обеспечение санитарно-эпидемиологического благополучия страны.

Большой научный и общественный интерес вызывает работа, проводимая А.Ю. Поповой во взаимодействии с российскими специалистами-нутрициологами по пропаганде оптимального питания как компонента здорового образа жизни, медико-гигиенической профилактики алиментарно-зависимых заболеваний населения России. Анна Юрьевна регулярно выступает с докладами на международных и всероссийских научных форумах по вопросам биобезопасности, обеспечения здоровья населения, снижения рисков от распространения инфекционной и неинфекционной патологии.

Многие годы под ее руководством Роспотребнадзор ведет работу в области международного технического регулирования производства и оборота пищевых продуктов и продовольственного сырья, в частности обеспечивает работу российской национальной контактной точки Комиссии Кодекс Алиментариус (учрежденной ФАО и ВОЗ).

Успешная государственная, общественная и научная деятельность Анны Юрьевны Поповой отмечена государственными наградами РФ: орденом Почета, медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени, а также нагрудным знаком «Почетный работник Роспотребнадзора».

Редколлегия журнала «Вопросы питания», коллектив ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» и все научное сообщество специалистов в области нутрициологии, гигиены питания и диетологии сердечно поздравляют Анну Юрьевну Попову со славным юбилеем и желают ей крепкого здоровья, счастья, благополучия и больших творческих успехов на благо нашей Родины!



Вероника Игоревна Скворцова (к юбилею)

1 ноября 2025 г. исполнилось 65 лет со дня рождения Вероники Игоревны Скворцовой – выдающегося государственного деятеля, ученого и организатора здравоохранения, член-корреспондента РАН, доктора медицинских наук, профессора, руководителя ФМБА России, заслуженного деятеля науки РФ, заслуженного врача РФ, действительного государственного советника РФ 1-го класса.

Свой профессиональный путь как специалиста в области профилактики и лечения инсульта и других сосудистых заболеваний В.И. Скворцова начала в 1989 г., возглавив одну из первых в России нейрореанимационных служб в Первой Градской больнице им. Н.И. Пирогова (Москва). Используя самые современные достижения отечественной и зарубежной медицины, она вывела лечение неврологических пациентов с неотложной патологией на качественно новый уровень. Приобретенный ею бесценный опыт лег в основу реорганизации оказания медицинской помощи пациентам с инсультом в нашей стране.

Деятельность В.И. Скворцовой на посту министра здравоохранения РФ (2012–2020 гг.) была направлена на модернизацию системы здравоохранения и совершенствование медицинской помощи населению. Под ее руководством и при непосредственном участии разработана и внедрена трехуровневая система оказания медицинской помощи. Были разработаны и внесены в Программу госгарантий медицинской помощи предельные сроки ожидания различных видов медпомощи,

в том числе неотложной, организован мониторинг ситуации в регионах и создана автоматизированная геоинформационная система. Для привлечения медработников на село были запущены федеральные программы «Земский доктор» и «Земский фельдшер». Получила распространение практика оказания высокотехнологичной медицинской помощи, создание сети перинатальных центров внесло решающий вклад в снижение материнской и младенческой смертности до национальных исторических минимумов и одних из самых низких показателей в мире. С 2013 г. восстановлена и развивается программа диспансеризации населения.

В.И. Скворцова – автор свыше 650 научных работ. Она главный редактор и один из авторов национального руководства по неврологии, автор и соавтор учебников по неврологии (включая международное издание Handbook of Clinical Neurology), а также монографий, методических рекомендаций, руководств для практических врачей, учебных пособий для студентов, ординаторов, аспирантов.

На посту руководителя ФМБА России В.И. Скворцова определяет и реализует стратегически важные направления российской медицины и науки, связанные с обеспечением безопасности и укреплением научно-технологического суверенитета нашего государства, сохранением здоровья граждан, работающих на предприятиях стратегических отраслей промышленности, жителей закрытых городов и наукоградов, развитием спортивной медицины, службы крови и донорства.

При ее активном участии в 2011 г. в Москве была организована и проведена под эгидой Всемирной организации здравоохранения Первая глобальная министерская конференция по здоровому образу жизни и неинфекционным заболеваниям, итогом которой стала Московская декларация, закрепившая принципы формирования здорового образа жизни, борьбы с факторами риска, создания единой здоровьесберегающей среды.

Высокий профессионализм В.И. Скворцовой на государственной, общественной и научной ниве отмечен рядом государственных наград: орденом Почета, орденом Александра Невского, орденами «За заслуги перед Отечеством» IV и III степени, орденом Пирогова и многими другими.

Веронику Игоревну отличают широкая эрудиция, исключительное трудолюбие, высокое чувство ответственности, государственный подход к решению стоящих перед ней задач.

Коллектив редакции журнала «Вопросы питания», сотрудники ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» и коллеги-ученые в области нутрициологии, гигиены питания и диетологии от всего сердца поздравляют Веронику Игоревну Скворцову с юбилеем и желают здоровья, счастья и неиссякаемой энергии для новых свершений на благо отечественной науки и страны!



Геннадий Григорьевич Онищенко (к юбилею)

21 октября 2025 г. исполнилось 75 лет со дня рождения Геннадия Григорьевича Онищенко – выдающегося ученого, одного из крупных организаторов санитарно-эпидемиологической службы страны и гигиенической науки, академика РАН, доктора медицинских наук, профессора, заведующего кафедрой экологии человека и гигиены окружающей среды Института общественного здоровья им. Ф.Ф. Эрисмана ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), заместителя президента ФГБУ «Российская академия образования», члена редакционной коллегии журнала «Вопросы питания», заслуженного врача РФ.

Многие десятилетия своей жизни Г.Г. Онищенко посвятил обеспечению санитарно-эпидемиологического благополучия населения начиная с 1993 г. в должности заместителя председателя Госкомсанэпиднадзора, с 1996 г. – первого заместителя министра здравоохранения РФ, Главного государственного санитарного врача РФ, с 2004 по 2013 г. – руководителя Роспотребнадзора. В этот период реорганизации государственной санитарно-эпидемиологической службы реализовались его высокий профессионализм, принципиальность и талант организатора. Под руководством и при самом непосредственном участии Г.Г. Онищенко были разработаны основополагающие документы, среди которых федеральные законы от 30.03.1999 № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения», от 02.01.2000 № 29-ФЗ «О качестве и безопасности пищевых продуктов», ряд постановлений Правительства РФ.

В 2013–2016 гг. он становится помощником Председателя Правительства РФ, а в 2016–2019 гг. – депутатом Государственной Думы Федерального Собрания VII созыва, первым заместителем председателя комитета Государственной Думы Федерального Собрания РФ по образованию и науке.

Фундаментальные научные исследования Г.Г. Онищенко в области организации санитарно-эпидемиологической службы страны, эпидемиологии инфекционных, эмерджентных и особо опасных инфекций внесли существенный вклад в организацию борьбы с этими инфекциями.

Под его руководством разработаны мероприятия по преодолению дефицита микронутриентов, создана современная система надзора за использованием генетически модифицированных источников пищи. По инициативе Г.Г. Онищенко впервые в Российской Федерации в 2013 г. было проведено заседание Комитета по загрязняющим веществам в пищевой продукции Комиссии Кодекс Алиментариус.

В сферу его деятельности входит развитие системы управления риском для здоровья населения Российской Федерации, особенно наиболее чувствительных групп (дети, беременные), проживающих в условиях химического загрязнения среды обитания, проблемы эпидемиологии и профилактики инфекционных и неинфекционных болезней, создание системы идентификации, прогнозирования рисков, разработка методологии планирования комплексов санитарно-гигиенических и противоэпидемических мероприятий с учетом природно-климатических условий территорий и гигиенической оценки состояния среды обитания человека.

Г.Г. Онищенко создана целая научная школа. Под его руководством подготовлено более 50 кандидатов и докторов наук. Он является автором более 1000 научных работ, в том числе свыше 50 монографий.

Г.Г. Онищенко награжден многими государственными наградами, в том числе орденом «За заслуги перед Отечеством» IV и III степени, орденом Почета; он лауреат Государственной премии РФ, дважды лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники.

Блестящий талант руководителя, принципиальная гражданская позиция, высокая культура общения и внимательное отношение к людям снискали Г.Г. Онищенко широкую известность и признание среди российской и международной общественности. Геннадием Григорьевичем накоплен неоценимый практический и научный опыт, который наряду с организаторскими способностями позволяет передавать его новому поколению работников.

Редколлегия журнала «Вопросы питания» и коллектив ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» сердечно поздравляют Геннадия Григорьевича Онищенко с юбилеем и желают ему крепкого здоровья, счастья, благополучия и больших творческих успехов на благо медицинской науки и здравоохранения!