

Медицина труда и экология человека

№3/2026

Сетевое издание

ISSN 2411 - 3794



12+

uniimtech.ru

Учредитель

Федеральное бюджетное учреждение науки

«Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека»

Главный редактор – А.Б. Бакиров, д.м.н., проф., академик АН РБ – советник директора ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека»

Зам. главного редактора – Д.О. Каримов, к.м.н.

Редакционный совет:

Богданова Н.В., Ph.D. (Германия, Ганновер),
Бухтияров И.В., д.м.н., проф., акад. РАН (Россия, Москва),
Зайцева Н.В., д.м.н., акад. РАН (Россия, Пермь),
Зеленко А.В., к.м.н. (Белоруссия, Минск),
Кузьмина Л.П., д.б.н. (Россия, Москва),
Май И.В., д.б.н., проф. (Россия, Пермь),
Мустафина И.З., к.м.н. (Россия, Москва),
Перов С.Ю., д.б.н. (Россия, Москва),
Попова А.Ю., д.м.н., проф. (Россия, Москва),
Потатурко А.В., д.м.н. (Россия, Екатеринбург),
Потеряева Е.Л., д.м.н. (Россия, Новосибирск),
Ракитский В.Н., д.м.н., акад. РАН (Россия, Москва),
Рахманин Ю.А., д.м.н., проф., акад. РАН (Россия, Москва),

Романович И.К., д.м.н., проф., акад. РАН (Россия, Санкт-Петербург),
Рыжов А.Я., д.м.н., проф. (Россия, Тверь),
Сарманаев С.Х., д.м.н., проф. (Россия, Москва),
Семенихин В.А., д.м.н. (Россия, Кемерово),
Спирин В.Ф., д.м.н., проф. (Россия, Саратов),
Сутункова М.П., д.м.н. (Россия, Екатеринбург),
Сычик С.И., к.м.н. (Белоруссия, Минск),
Тутельян В.А., д.м.н., проф., акад. РАН (Россия, Москва),
Фатхутдинова Л.М., проф., д.м.н. (Россия, Казань),
Хамидулина Х.Х., д.м.н., проф. (Россия, Москва),
Хотимченко С.А., д.м.н., проф., член-корр. РАН (Россия, Москва),
Чхвиркия Е.Г., д.м.н., проф. (Россия, Москва)

Редакционная коллегия:

Абдрахманова Е.Р., к.м.н. (Россия, Уфа),
Багрянцева О.В., д.б.н. (Россия, Москва),
Бухарина И.Л., д.б.н. (Россия, Ижевск),
Бактыбаева З.Б., к.б.н. (Россия, Уфа),
Валеева Э.Т., д.м.н. (Россия, Уфа),
Викторова Т.В., д.м.н., проф. (Россия, Уфа),
Гайнуллина М.К., д.м.н., проф. (Россия, Уфа),
Гимаева З.Ф., д.м.н. (Россия, Уфа),
Гильманов А.Ж., д.м.н., проф. (Россия, Уфа),
Даукаев Р.А., к.б.н. (Россия, Уфа),
Ефимочкина Н.Р., д.б.н. (Россия, Москва),
Зайдуллин И.И., к.м.н. (Россия, Уфа),
Кулагин А.А., д.б.н. (Россия, Уфа)

Карамова Л.М., д.м.н., проф. (Россия, Уфа),
Каримова Л.К., д.м.н., проф. (Россия, Уфа),
Ларионов М.В., д.б.н. (Россия, Москва),
Масягутова Л.М., д.м.н. (Россия, Уфа),
Мухаметзянов А.М., д.м.н. (Россия, Уфа),
Степанов Е.Г., к.м.н. (Россия, Уфа),
Сулейманов Р.А., д.м.н. (Россия, Уфа),
Терегулова З.С., д.м.н., проф. (Россия, Уфа),
Туйгунов М.М., д.м.н., проф. (Россия, Уфа),
Хайров Х.С., д.м.н. (Таджикистан, Душанбе),
Шайхлисламова Э.Р., к.м.н. (Россия, Уфа),
Шарафутдинова Н.Х., д.м.н., проф. (Россия, Уфа)

Редакция:

зав. редакцией – Э.Б. Султанова

научные редакторы – д.м.н. Р.А. Сулейманов,
к.м.н. Ю.В. Рябова

переводчики – З.Р. Палютина, Г.М. Башарова

корректор – Р.Р. Ахмадиева

верстка – Э.Б. Султанова

Адрес редакции: Российская Федерация, 450106, Республика Башкортостан,

город Уфа, улица Степана Кувыкина, дом 94

Тел.: (347) 255-19-57, факс: (347) 255-56-84

E-mail: journal@uniimtech.ru

Электронная версия журнала – на сайте <http://uniimtech.ru/>

ЗАРЕГИСТРИРОВАН В ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЛУЖБЕ ПО НАДЗОРУ В СФЕРЕ СВЯЗИ, ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ 29.05.2020, НОМЕР СВИДЕТЕЛЬСТВА ЭЛ № ФС77-78392

Журнал входит в Перечень российских рецензируемых научных журналов, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации (ВАК) для публикации результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук. Уровень в Едином государственном перечне научных изданий (ЕГПНИ) – «Белый список» - 4.

Основан в 2015 году. Выходит 4 раза в год.

Перепечатка текстов без разрешения редакции запрещена.

При цитировании материалов ссылка на журнал обязательна.

Возрастное ограничение: 12+. Подписано в печать: 28.09.2026

©ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», 2026

Occupational Health and Human Ecology

№3/2026

ISSN 2411-3794

Founder

Federal State-Funded Institution of Science

Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology

Editor-in-Chief – A.B. Bakirov, M.D., Professor of Medicine, Academician of the Bashkortostan Academy of Sciences – Director's Advisor Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology

Deputy Chief Editor – D.O. Karimov, PhD of Medicine

Editorial Board:

Bogdanova N.V., Ph.D. (Germany, Hanover),

Bukhtiyarov I.V., M.D., Professor of Medicine, academician of RAS (Russia, Moscow),

Chkhvirkiya E.G., M.D., Professor of Medicine (Russia, Moscow),

Khamidulina Kh.Kh., M.D., Professor of Medicine (Russia, Moscow),

Khotimchenko S.A., M.D., Professor of Medicine, Corresponding member of RAS (Russia, Moscow),

Kuzmina L.P., Doctor of Biology (Russia Moscow)

May I.V., Doctor of Biology, Professor (Russia, Perm),

Mustafina I.Z., Ph.D. (Medicine) (Russia, Moscow),

Perov S.Yu., Doctor of Biology (Russia, Moscow)

Popova A.Yu., M.D., Professor of Medicine (Russia, Moscow),

Potaturko A.V., M.D. (Russia, Yekaterinburg)

Poteryaeva E.L., M.D. (Russia, Novosibirsk),

Rakhmanin Yu.A., M.D., Professor of Medicine (Russia, Moscow),

Ryzhov A.Ya., Doctor of Biology, Professor (Russia, Tver),

Rakitsky V.N., M.D., Academician of RAS (Russia, Moscow),

Romanovich I.K., M.D., Professor of Medicine (Russia, St. Petersburg),

Sarmanaev S.Kh., M.D., Professor of Medicine (Russia, Moscow),

Semenikhin V.A., M.D. (Russia, Kemerovo)

Spirin V.F., M.D., Professor of Medicine (Russia, Saratov),

Sutunkova M.P., M.D. (Russia, Yekaterinburg),

Sychik S.I., Ph.D. (Medicine) (Belarus, Minsk),

Tutelian V.A., M.D., Professor of Medicine, acad. of RAS (Russia, Moscow),

Fatkhutdinova L.M., M.D., Professor of Medicine (Russia, Kazan),

Zaitseva N.V., M.D., Academician of RAS (Russia, Perm),

Zelenko A.V., Ph.D. (Medicine) (Belarus, Minsk)

Editorial Council:

Abdrakhmanova E.R., (Medicine) (Russia, Ufa),

Bagryantseva O.V. D.Sc. (Biology) (Russia, Moscow),

Bukharina I.L. D.Sc. (Biology) (Russia, Izhevsk),

Baktybaeva Z.B., Ph.D. (Biology) (Russia, Ufa),

Efimochkina N.R. D.Sc. (Biology) (Russia, Moscow),

Daukaev R.A., Cand.Sc. (Biology) (Russia, Ufa),

Gainullina M.G., M.D., Professor of Medicine (Russia, Ufa),

Gimaeva Z.F., M.D. (Russia, Ufa),

Gilmanov A.Zh., M.D. (Russia, Ufa),

Karamova L.M., M.D., Professor of Medicine (Russia, Ufa),

Karimova L.K., M.D., Professor of Medicine (Russia, Ufa),

Kulagin A.A., D.Sc. (Biology) (Russia, Ufa)?

Zaydullin I.I., (Medicine) (Russia, Ufa),

Masyagutova L.M., M.D. (Russia, Ufa),

Mukhametzyanov A.M., D.Sc. (Medicine) (Russia, Ufa)

Larionov M.V. D.Sc. (Biology) (Russia, Moscow),

Shaikhislamova E.R., Ph.D. (Medicine) (Russia, Ufa),

Sharafutdinova N.Kh., M.D., Professor of Medicine (Russia, Ufa),

Suleymanov R.A., M.D. (Russia, Ufa),

Stepanov E.G., Ph.D. (Medicine) (Russia, Ufa),

Teregulova Z.R., M.D., Professor of Medicine (Russia, Ufa),

Tuigunov M.M., M.D., Professor of Medicine (Russia, Ufa),

Khairov Kh.S., Ph.D., M.D. (Tadjikistan, Dushanbe)

Valeeva E.T., M.D. (Russia, Ufa),

Viktorova T.V., M.D., Professor of Medicine (Russia Ufa)

Editors:

Managing Editor – Sultanova E.B.

Science Editor - Suleymanov R.A., M.D.,

Ryabova Yu.V., PhD of Medicina

Translators – Palyutina Z.R., Basharova G.M.

Proofreader - Akhmadieva R.R.

Layout – Sultanova E.B.

Editorial office: Russian Federation, 450106, Republic of Bashkortostan, 94, Kuvykina Ul., Ufa.

Phone: (347) 255-19-57, fax: (347) 255-56-84

E-mail: journal@uniimtech.ru

The electronic version of the journal is on the website <http://uniimtech.ru/>

REGISTERED IN THE FEDERAL SERVICE FOR SUPERVISION IN THE FIELD OF COMMUNICATION, INFORMATION TECHNOLOGIES AND MASS COMMUNICATIONS

29.05.2020, CERTIFICATE NUMBER EL No. FS77-78392

The journal is included in the list of peer-reviewed scientific journals and publications recommended by the Higher Attestation Commission of the Russia under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (HAC) for publishing the main scientific results of a dissertation for the degree of Candidate and Doctor of sciences. Its level in the Unified State List of Scientific Publications (EGPNI)—the "White List"—is 4.

Reprinting of texts without permission of the publisher is prohibited.

When quoting materials reference to the journal is required.

Age restriction: 12+. Signed to print 28.09.2026

СОДЕРЖАНИЕ

Медицина труда	
6	ВКЛАД ФБУН «УФИМСКИЙ НИИ МЕДИЦИНЫ ТРУДА И ЭКОЛОГИИ ЧЕЛОВЕКА» В ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗДРАВООХРАНЕНИЕ Шайхлисламова Э.Р., Бакиров А.Б., Борисова А.И., Карамова Л.М., Гимранова Г.Г., Гайнуллина М.К., Абдрахманова Е.Р., Валеева Э.Т., Сайфуллин Д.М., Зайдуллин И.И., Галимова Р.Р., Кабирова Э.Ф.
26	ЗАЩИТА РАБОТАЮЩЕГО НАСЕЛЕНИЯ ЮЖНЫХ РЕГИОНОВ ОТ НЕГАТИВНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА. ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ Лосик Т.К., Конюхов А.В.
47	МЕДИКО-ДЕМОГРАФИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ И СОСТОЯНИЕ ЗДОРОВЬЯ РАБОТАЮЩЕГО НАСЕЛЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БАШКОРТОСТАН Мулдашева Н.А., Ильина Л.А., Бакиров А.Б., Каримова Л.К., Валеев Т.К.
71	МЕХАНИЗМЫ ПУЛЬМОНОТОКСИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ НАНОЧАСТИЦ (ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР) Гертан Н.А., Минигалиева И.А., Батенева В.А., Слободчикова А.С.
88	НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОФИЛАКТИКИ АЛЛЕРГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ У ЛИЦ, КОНТАКТИРУЮЩИХ С ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ АЛЛЕРГЕНАМИ И ИРРИТАНТАМИ Борисова А.И., Бакиров А.Б., Абдрахманова Е.Р., Зайдуллин И.И., Кабирова Э.Ф., Галимова Е.С., Галимова Р.Р., Дистанова А.А., Рафикова Л.И.
106	ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОЛИМОРФИЗМОВ ГЕНА <i>CROX</i> С УРОВНЕМ КОПРОПОРФИРИНА И ЭРИТРОПОЭЗА У РАБОТНИКОВ ПРОИЗВОДСТВА СВИНЦА ИЗ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ Шаихова Д.Р., Кикоть А.М., Берёза И.А., Полянина Д.Д., Боковой В.Д., Сутункова М.П.
124	ДИСБИОТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОБИОТЫ СЛИЗИСТОЙ ОБОЛОЧКИ ПОЛОСТИ РТА И ГЛОТКИ У РАБОТНИКОВ ПТИЦЕВОДСТВА Гизатуллина Л.Г., Бакиров А.Б., Масягутова Л.М., Калимуллина С.Н., Ахметова Г.Н., Зайдуллин И.И., Чудновец Г.М.
Гигиена труда	
148	КОМПЛЕКСНАЯ ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ТРУДА И ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ПЕРСОНАЛА ОТДЕЛЕНИЙ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ Бушманов А.Ю., Титова Н.А., Каримова Д.Ю.
169	ПРИМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ПОСРЕДСТВОМ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ: АНАЛИЗ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ НОРМАТИВНЫМИ ДОКУМЕНТАМИ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИМИ ИХ БЕЗОПАСНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ Микеров А.Н., Быков А.В., Эрдниев Л.П.

189	ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ РАБОТНИКОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПРОФИЛЯХ НАПРЯЖЕННОСТИ ТРУДОВОГО ПРОЦЕССА: РЕЗУЛЬТАТЫ СКРИНИНГОВОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ГРУПП Новикова А.В., Широков В.А., Егорова А.М.
208	БИОМОНИТОРИНГ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ НАГРУЗКИ Ларионова Т.К., Даукаев Р.А., Иващенко М.А., Артёменко Е.П., Адиева Г.Ф., Аллаярова Г.Р., Зеленковская Е.Е.
Гигиена питания	
228	ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ В РЕСПУБЛИКЕ БАШКОРТОСТАН Бакиров А.Б., Даукаев Р.А., Ларионова Т.К., Афонькина С.Р., Аухадиева Э.А., Курилов М.В., Усманова Э.Н.
Профилактическая токсикология	
247	ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗДРАЖАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ НА КОЖУ И СЛИЗИСТЫЕ ОБОЛОЧКИ ГЛАЗ НА ПРИМЕРЕ QSAR-СИСТЕМЫ OECD QSAR TOOLBOX Хамидулина Х.Х., Тарасова Е.В., Горбунова Д.И., Замкова И.В.
270	КЛЕТОЧНАЯ ЛИНИЯ IAR-2 HyPer ДЛЯ ОЦЕНКИ РАННЕГО ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ОТВЕТА НА ТОКСИКАНТЫ Каримов Д.О., Якупова Т.Г., Рябова Ю.В., Репина Э.Ф., Кудояров Э.Р., Каримов Д.Д., Гарипова З.Р.
287	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ <i>CHLORELLA</i> В КАЧЕСТВЕ БИОПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО СРЕДСТВА (ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР) Гертан Н.А., Минигалиева И.А., Сутункова М.П., Куляшова П.Д., Гурвич В.Б., Мажаева Т.В.
305	ВЛИЯНИЕ ПЕКТИНА НА ОСНОВЕ ОКСИМЕТИЛУРАЦИЛА НА ЭКСПРЕССИЮ ГЕНА ZIP8 В ТКАНЯХ ПОЧЕК И ПЕЧЕНИ КРЫС ПРИ ХРОНИЧЕСКОЙ КАДМИЕВОЙ ИНТОКСИКАЦИИ Зиатдинова М.М., Кудояров Э.Р., Хуснутдинова Н.Ю., Ахмадеев А.Р., Каримов Д.Д., Гизатуллина А.А., Каримов Д.О., Зимин Ю.С., Борисова Н.С., Хакимова И.М.
Памятные даты	
321	К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ КАЦНЕЛЬСОНА БОРИСА АЛЕКСАНДРОВИЧА Сутункова М.П., Минигалиева И.А., Устюгова Т.С.
324	К 80-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ЛИПАТОВА ГЕОРГИЯ ЯКОВЛЕВИЧА Сутункова М.П., Газимова В.Г., Адриановский В.И., Самылкин А.А., Нарицына Ю.Н.
328	ПАМЯТИ ТРУБЕЦКОВА АЛЕКСЕЯ ДМИТРИЕВИЧА Бабанов С.А.

УДК 613: 614.2

ВКЛАД ФБУН «УФИМСКИЙ НИИ МЕДИЦИНЫ ТРУДА И ЭКОЛОГИИ ЧЕЛОВЕКА» В ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗДРАВООХРАНЕНИЕ

Шайхлисламова Э.Р.¹, Бакиров А.Б.^{1,2,3}, Борисова А.И.¹, Карамова Л.М.¹,
Гимранова Г.Г.¹, Гайнуллина М.К.¹, Абдрахманова Е.Р.^{1,2}, Валеева Э.Т.^{1,2},
Сайфуллин Д.М.², Зайдуллин И.И.¹, Галимова Р.Р.^{1,2}, Кабирова Э.Ф.¹

¹ ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», Уфа, Россия

² ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет»
Минздрава России, Уфа, Россия

³ Академия наук Республики Башкортостан, Уфа, Россия

Для индустриальных регионов сохранение здоровья работающего населения требует не только оказания медицинской помощи, но и постоянного научного сопровождения профилактики профессиональных и производственно обусловленных заболеваний.

Цель. Обобщить основные этапы становления и развития ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека» как научно-клинического, экспертного и организационно-методического центра медицины труда.

Материалы и методы. Проведен историко-аналитический обзор опубликованных научных трудов, отчетных и юбилейных материалов, а также современных публикаций, отражающих деятельность института по гигиене труда, промышленной токсикологии, профессиональной патологии, медицинской экологии и охране здоровья работающих.

Результаты. Становление института проходило от санитарно-гигиенического сопровождения нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности к комплексной модели профилактики, диагностики, лечения, реабилитации и экспертизы профессиональных заболеваний. В ранние годы институт разрабатывал санитарные правила, предельно допустимые концентрации, инженерно-технические мероприятия и рекомендации по оздоровлению условий труда. В последующие десятилетия были усилены клинические, профпатологические и диспансерные направления, развиты взаимодействие с практическим здравоохранением, профпатологический центр и регистр профессиональной патологии. Современный этап характеризуется риск-

ориентированным подходом, биомониторингом, молекулярно-генетическими и токсикологическими исследованиями, направленными на выделение групп повышенного риска и персонализацию профилактики.

Заключение. Опыт института демонстрирует устойчивую модель трансляции научных результатов в практику охраны здоровья работающего населения.

Ключевые слова: медицина труда, гигиена труда, промышленная токсикология, профпатология, профилактика, Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека

Использование инструментов искусственного интеллекта: авторы заявляют, что при подготовке настоящей рукописи системы искусственного интеллекта не применялись.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Шайхлисламова Э.Р., Бакиров А.Б., Борисова А.И., Карамова Л.М., Гимранова Г.Г., Гайнуллина М.К., Абдрахманова Е.Р., Валеева Э.Т., Сайфуллин Д.М., Зайдуллин И.И., Галимова Р.Р., Кабирова Э.Ф. Вклад ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека» в практическое здравоохранение. Медицина труда и экология человека. 2026; 3: 6 -25.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10301>

Для корреспонденции: Алла Ивановна Борисова, e-mail: alla.borisova.ufa@gmail.com

CONTRIBUTION OF THE FEDERAL BUDGETARY SCIENTIFIC INSTITUTION "UFA RESEARCH INSTITUTE OF OCCUPATIONAL HEALTH AND HUMAN ECOLOGY" TO PRACTICAL HEALTHCARE

Shaikhislamova E.R.¹, Bakirov A.B.^{1,2,3}, Borisova A.I.¹, Karamova L.M.¹, Gimranova G.G.¹, Gainullina M.K.¹, Abdrakhmanova E.R.^{1,2}, Valeeva E.T.^{1,2}, Saifullin D.M.², Zaidullin I.I.¹, Galimova R.R.^{1,2}, Kabirova E.F.¹

¹Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, Russia

²Bashkir State Medical University, Ufa, Russia

³Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, Ufa, Russia

In industrial regions, protecting the health of workers requires not only medical care but also continuous scientific support for the prevention of occupational and work-related diseases.

Objective. To summarize the key stages in the formation and development of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology as a scientific, clinical, expert and methodological center for occupational health.

Materials and methods. A historical and analytical review was performed using published scientific works, reporting and anniversary materials, and recent publications describing the institute's activities in occupational hygiene, industrial toxicology, occupational pathology, human ecology and workers' health protection.

Results. The institute's development is shown as a transition from sanitary and hygienic support for the oil production, oil refining and petrochemical industries to an integrated model of prevention, diagnosis, treatment, rehabilitation and expert assessment of occupational diseases. In the early period, the institute developed sanitary rules, maximum permissible concentrations, engineering measures and recommendations for improving working conditions. In subsequent decades, clinical, occupational pathology and follow-up care activities were strengthened, together with cooperation with practical healthcare institutions, an occupational pathology center and a registry of occupational diseases. The current stage is characterized by risk-oriented approaches, biomonitoring, molecular genetic and toxicological studies aimed at identifying high-risk groups and individualizing preventive measures.

Conclusion. The experience of the institute demonstrates a sustainable model for translating scientific results into practical measures for protecting the health of the working population.

Keywords: occupational medicine, occupational hygiene, industrial toxicology, occupational pathology, prevention, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology

Declaration of AI use: the authors declare that no artificial intelligence tools were used in the preparation of this manuscript.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Funding: the study did not have sponsorship.

For citation: Shaikhislamova E.R., Bakirov A.B., Borisova A.I., Karamova L.M., Gimranova G.G., Gainullina M.K., Abdrakhmanova E.R., Valeeva E.T., Saifullin D.M., Zaidullin I.I.,

Galimova R.R., Kabirova E.F. Contribution of the federal budgetary scientific institution "Ufa research institute of occupational health and human ecology" to practical healthcare. Occupational health and human ecology. 2026; 3: 6 - 25.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10301>

For correspondence: Alla I. Borisova, e-mail: alla.borisova.ufa@gmail.com

Медицина труда формируется на стыке санитарно-гигиенического анализа производственной среды, клинической диагностики, экспертной оценки и организационных решений в системе здравоохранения. Для промышленных регионов с развитой нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической и газовой промышленностью такой подход имеет прикладное значение. Он позволяет оценивать здоровье работников не только через факт установленного профессионального заболевания, но и с учетом длительного воздействия совокупности факторов трудового процесса и производственной среды.

История ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека» отражает развитие отечественной профилактической медицины от гигиены труда производств к научно-клинической модели, включающей профилактику, диагностику, лечение, реабилитацию, профпатологическую экспертизу и управление профессиональными рисками. Создание института в 1955 г. было связано с необходимостью научного изучения условий труда и состояния здоровья работников нефтяной отрасли Башкирской АССР. При этом уже в первые годы была сформирована междисциплинарная структура, объединившая гигиену труда, предупредительный санитарный надзор, промышленную токсикологию, промышленно-санитарную химию и клиническое направление [1, 7, 9-11].

Актуальность анализа такого опыта определяется тем, что вклад научного учреждения в здравоохранение не исчерпывается числом выполненных исследований или опубликованных работ. Значение института проявляется в том, насколько результаты научных исследований трансформируются в конкретные профилактические, нормативно-методические, клинические и экспертные решения, влияющие на сохранение трудоспособности и профессионального долголетия работающего населения [7, 10, 11, 13].

Цель исследования. Обобщить основные этапы становления и развития ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека» как научно-клинического, экспертного и организационно-методического центра профилактики, диагностики

и специализированной помощи.

Материалы и методы. Выполнен историко-аналитический обзор опубликованных научных трудов, сборников, отчетных, юбилейных и современных аналитических материалов, отражающих деятельность Уфимского НИИ гигиены и профессиональных заболеваний, впоследствии - ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека». В обзор включены источники, посвященные результатам работы института в 1956-1966, 1966-1970, 1971-1975, 1976-1980 гг., материалам взаимодействия с практическим здравоохранением, а также публикациям 2015, 2020, 2022, 2024 и 2025 гг. [1-21].

Материалы систематизированы по нескольким блокам: гигиена труда и санитарное нормирование, промышленная токсикология, клиническое и профпатологическое направление, взаимодействие с практическим здравоохранением, экологические и профессиональные риски, современные молекулярно-генетические и токсикологические подходы.

Результаты и обсуждение

Становление института и формирование гигиенического направления

Первый этап развития института был связан с санитарно-гигиеническим сопровождением быстро растущей нефтяной, нефтехимической и химической промышленности Башкирской АССР. В 1956-1966 гг. сотрудниками Уфимского НИИ гигиены и профессиональных заболеваний было выполнено свыше 150 научно-исследовательских работ, охватывавших гигиену и физиологию труда, промышленную токсикологию, профессиональную патологию, санитарную охрану атмосферного воздуха и водоемов. Особое значение имели исследования условий труда на нефтепромыслах, нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях, оценка воздействия шума, вибрации и токсических веществ, а также изучение состояния здоровья работников [1].

Практическая направленность раннего этапа проявлялась в прямом выходе научных результатов на профилактику профессиональных заболеваний и улучшение условий труда. В лабораториях института были исследованы токсические свойства 55 новых химических веществ, подготовлено более 800 научно обоснованных предложений для предприятий, значительная часть которых была связана со снижением загрязнения производственной среды, автоматизацией и механизацией тяжелых производственных процессов. Клиническим отделом института было проконсультировано 24 662 рабочих и

служащих, проведено углубленное обследование 17 927 работников нефтяной промышленности [1]. Эти данные показывают, что уже в первое десятилетие институт выполнял не только исследовательскую, но и клинико-профилактическую функцию.

В 1966–1970 гг. институт окончательно оформился как междисциплинарный научно-практический центр. За пятилетие было выполнено 121 научно-исследовательское направление, большинство работ имело комплексный характер, а доля работ народнохозяйственного значения достигала 92%. Практический вклад включал подготовку 792 предложений по герметизации оборудования, сокращению пробоотборных операций, автоматизации и дистанционному контролю технологических процессов, разработку 5 санитарных правил, установление предельно допустимых концентраций для 23 веществ и проведение санитарной экспертизы 261 проекта [2]. Таким образом, институт стал важным звеном научного обеспечения санитарного надзора и профилактической медицины в промышленном регионе.

Переход к комплексному сопровождению и внедрению профилактических программ на промышленных предприятиях

В 1971-1975 гг. усилилась прикладная направленность исследований: коллективом института было выполнено 111 научно-исследовательских тем, из которых 84,3% имели народнохозяйственное значение. Исследования включали гигиеническую оценку новых и действующих нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств, изучение воздействия токсических веществ, производственного шума, неблагоприятного микроклимата, тяжести труда и особенностей технологических процессов. Клиническое направление включало в себя исследование и оказание помощи при хронических интоксикациях, бронхолегочной патологии, в том числе - профессиональной бронхиальной астме, аллергических дерматозах, поражениях периферической нервной системы, органов пищеварения, а также при нарушении здоровья женщин, занятых на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях [3].

Важной особенностью этого периода стало расширение исследований за пределы стационарных производств. Результаты исследования по гигиене труда буровых бригад отражали сочетанное воздействие физической и нервно-мышечной нагрузки, неблагоприятных метеорологических условий, производственного шума, вибрации и пыли [4]. Такой подход соответствует современной логике медицины труда, в которой здоровье работника рассматривается как результат

взаимодействия технологических, санитарно-гигиенических, клинических, организационных и социальных факторов.

Одним из примеров научно-практического вклада ученых института в улучшение условий труда на промышленных предприятиях стала гигиеническая оценка инженерно-технических мероприятий на объектах маслблоков нефтеперерабатывающих заводов Уфы, Киришей, Новополюцка, Новокуйбышевска и Омска. Основное значение имели замена устаревшего насосного оборудования, внедрение торцевых и бессальниковых уплотнений, локальной вытяжной вентиляции, герметизация узлов, замена бензола метилэтилкетонем в процессах депарафинизации и совершенствование компрессорного и фильтровального оборудования [4, 5]. Показатели снижения загрязнения воздуха рабочей зоны демонстрировали практическую эффективность инженерной профилактики: содержание бензола в тройном растворителе уменьшилось до 17% против 40% в 1958 г., после замены бензола на метилэтилкетон загрязнение воздушной среды бензолом на отдельных объектах было практически исключено, концентрации толуола снизились в 2,4-3,3 раза, ацетона - в 14,5-40,6 раза, аммиака - в 3,9-4,2 раза, фенола - в 8,4-14,5 раза, а содержание углеводородов на ряде установок - в десятки раз [4, 5]. Этот пример показывает ключевой механизм вклада института: переход от выявления вредных факторов к разработке, внедрению и оценке мероприятий, непосредственно снижавших профессиональный риск.

Институт как связующее звено между наукой и практическим здравоохранением

В период с 1976 по 1985 гг. научная деятельность института характеризовалась переходом к крупным комплексным исследованиям, ориентированным на решение прикладных задач профилактической медицины, санитарного надзора и охраны здоровья работников ведущих отраслей промышленности. Развивались направления гигиены труда и профессиональной патологии в нефтяной, нефтеперерабатывающей, нефтехимической и газовой промышленности, промышленной токсикологии, санитарной охраны атмосферного воздуха, водоемов и почвы, а также гигиены детей и подростков [5, 6].

Существенным результатом стало сочетание производственно-гигиенических обследований с клинической оценкой состояния здоровья работников, разработкой рекомендаций по режимам труда и отдыха, оказанию медицинской помощи, реабилитации, профессиональному отбору и рациональному использованию труда женщин на промышленных объектах. Практическая значимость таких исследований заключалась в том, что они переводились в

диагностические, лечебно-профилактические и нормативно-методические решения [5, 6].

Особую роль играло взаимодействие института с учреждениями практического здравоохранения. Совместная работа включала комплексные научно-исследовательские и научно-практические работы по заявкам промышленных предприятий, производственных объединений, санитарно-эпидемиологических станций, медико-санитарных частей, министерств и проектных организаций; консультативно-методическую помощь врачам, а также проведение научно-практических конференций, семинаров, курсов информации и санитарно-просветительной работы [7, 9]. В этот период институтом было выполнено 12 научно-практических работ, оказано 2152 консультации в поликлинике и клинике института и 123 консультации вне института, проведено лечение и обследование 1569 человек в стационаре, а число посещений поликлиники составило 34 445. В нефтеперерабатывающей промышленности Башкирской АССР охват работников периодическими медицинскими осмотрами достигал 99,1-99,6%, а внедрение 5-ти групповой системы диспансерного учета позволяло обеспечить систематический врачебный контроль значительной части работающих. Совершенствование профпатологической помощи и профилактических мероприятий сопровождалось снижением профессиональной заболеваемости на предприятиях Уфы, а также уменьшением заболеваемости с временной утратой трудоспособности [6, 7, 9].

Клинико-экспертное направление и профпатологическая помощь

Важным этапом является организация Республиканского профпатологического центра. На базе института была создана структура, ориентированная не только на научное изучение профессиональных факторов риска, но и на практическое решение задач специализированной медицинской помощи работающему населению. Деятельность центра включает диагностику профессиональных заболеваний, установление связи заболевания с профессией, рассмотрение сложных экспертных случаев, контроль качества предварительных и периодических медицинских осмотров, а также взаимодействие с органами здравоохранения, санитарно-эпидемиологического надзора, медико-социальной экспертизы и учреждениями практического здравоохранения [9-11].

Профпатологическое направление института встроено в более широкую систему научно-практической профилактики. В отделе охраны здоровья работающих обеспечивается клиническое изучение профессиональной и производственно обусловленной патологии, разработка подходов к диспансерному наблюдению,

лечению и реабилитации работников промышленных предприятий. Одновременно сотрудники отдела гигиены труда и медицинской экологии оценивают состояние атмосферного воздуха, водных объектов, почвы, санитарно-защитных зон и промышленных выбросов, отдела промышленной токсикологии формируют экспериментальную и нормативную основу безопасного обращения с химическими веществами и нефтепродуктами [10, 11].

Современная клиническая база института включает консультативно-поликлиническое отделение и стационар, что обеспечивает возможность комплексного обследования пациентов с подозрением на профессиональную и производственно обусловленную патологию. В аналитических материалах указывается, что клиника располагает стационаром на 160 коек, консультативно-поликлиническим отделением на 200 посещений в день, широким спектром общеклинических, биохимических и иммунологических методик; ежегодно лечение получают более 3000 пациентов [9, 10].

Медицинская помощь включает не только лечебный, но и профилактический, экспертный и социальный компоненты: раннее выявление лиц с подозрением на профессиональную патологию, углубленное обследование, оценку связи заболевания с вредными производственными факторами, решение вопросов профессиональной пригодности и маршрутизацию пациента [10, 11, 13].

Современный этап: риск-ориентированный подход и элементы персонализированной профилактики

Современный этап деятельности института характеризуется переходом от преимущественно отраслевых санитарно-гигиенических исследований к комплексной риск-ориентированной модели охраны здоровья населения и работающих контингентов с внедрением корпоративных программ на производствах [10, 12, 13, 17, 20, 21]. В 2006-2010 гг. деятельность института была ориентирована на решение задач гигиенической безопасности и предупреждение неблагоприятного воздействия факторов окружающей и производственной среды на здоровье населения [7, 9]. В период с 2011 по 2020 годы в рамках отраслевой программы «Гигиеническое обоснование минимизации рисков для здоровья населения России» проводились исследования, направленные на оценку факторов риска среды обитания, гигиеническую безопасность сельского водоснабжения, управление профессиональными рисками в нефтедобывающей, нефтехимической и резинотехнической промышленности, а также на изучение сердечно-сосудистой, аллергической и гепатобилиарной патологии у работников промышленных

предприятий [8, 9, 16]. В 2021-2025 гг. тематика института получила развитие в рамках комплексного подхода к обеспечению санитарно-эпидемиологического благополучия, управлению рисками здоровью, сохранению трудового потенциала и повышению качества жизни населения [10-15, 17-21].

Таким образом, научная деятельность ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека» в разные годы была связана с последовательным развитием направлений гигиенической безопасности, минимизации рисков для здоровья, научного обоснования профилактических мероприятий и формирования современной системы управления санитарно-эпидемиологическим благополучием населения.

Значимое место заняли исследования тяжелых металлов в объектах окружающей среды и биосредах населения индустриального города, разработка рекомендаций по профилактике загрязнения питьевой воды, оценка профессионально обусловленной хронической патологии у работников нефтедобычи и нефтехимии, а также изучение канцерогенных и неканцерогенных рисков для населения территорий размещения предприятий нефтепереработки и нефтехимии [8, 9]. Эти направления расширили традиционную область медицины труда и связали ее с медицинской экологией и социально-гигиеническим мониторингом [8-10].

Отдельным направлением стало развитие молекулярно-генетических подходов к выявлению групп повышенного риска профессиональных аллергических заболеваний и нарушений гепатобилиарной системы у работников промышленных предприятий [9, 10]. В совокупности с биомониторингом, токсикологической диагностикой и оценкой профессиональных и экологических рисков это формирует основу персонализированной профилактики в медицине труда: профилактические мероприятия могут быть ориентированы не только на средние показатели воздействия, но и на группы работников с повышенной индивидуальной уязвимостью [17, 20, 21].

Основой остается снижение воздействия вредных производственных факторов на уровне технологического процесса, оборудования, вентиляции, регламента труда и медицинского наблюдения, молекулярно-генетические, биомониторинговые и клинико-лабораторные методы позволяют точнее выделять группы риска, уточнять маршрутизацию, глубину диспансерного наблюдения и профилактические рекомендации [17, 20, 21].

Научно-клиническая модель трансляции результатов в практику

Анализ исторических и современных материалов показывает, что вклад Уфимского НИИ медицины труда и экологии человека состоит в создании устойчивой модели трансляции научных данных в практику профилактического здравоохранения. В этой модели гигиеническая диагностика производственной среды становится исходной точкой для санитарного нормирования и инженерной профилактики; промышленная токсикология обеспечивает экспериментальное и нормативное обоснование безопасности веществ; клинические подразделения выявляют ранние и развернутые формы профессиональной и производственно обусловленной патологии; профпатологический центр обеспечивает экспертную оценку связи заболевания с профессией и методическое сопровождение службы профессиональной патологии [7, 9-11].

Системообразующее значение института проявляется в соединении науки, клиники, санитарного надзора, экспертной работы, подготовки кадров и взаимодействия с промышленными предприятиями. Такой подход позволяет рассматривать медицинскую помощь работающему населению как непрерывный процесс: от выявления факторов риска и разработки профилактических мероприятий до диагностики, лечения, реабилитации, диспансерного наблюдения и принятия экспертных решений [7, 10, 11, 13].

Опыт института демонстрирует, что развитие медицины труда требует постоянного обновления методического инструментария. Если ранние этапы были связаны преимущественно с гигиенической оценкой условий труда, разработкой санитарных правил, ПДК и инженерных рекомендаций, то современный этап дополняется оценкой профессиональных и экологических рисков, биомониторингом, молекулярно-генетическими маркерами, изучением хронической неинфекционной патологии, аллергических и гепатобилиарных нарушений, а также оценкой влияния среды обитания на здоровье населения промышленных территорий [8-10, 13-21]. История ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека» отражает эволюцию отечественной медицины труда от санитарно-гигиенического сопровождения нефтяной, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности к комплексной научно-клинической модели охраны здоровья работающего населения. Существенным результатом стало формирование системы взаимодействия с практическим здравоохранением: консультативной и стационарной помощи, диспансерного наблюдения, профилактических обязательных медицинских осмотров, профпатологической экспертизы и подготовки кадров [7, 9-11, 13]. Создание и развитие

профпатологического направления, включая Республиканский профпатологический центр, обеспечило специализированную диагностику, установление связи заболевания с профессией, экспертное сопровождение и методическую поддержку службы профессиональной патологии [9-11]. Современный этап характеризуется развитием риск-ориентированного подхода, медицинской экологии, биомониторинга, молекулярно-генетических и токсикологических исследований, что формирует предпосылки для персонализированной профилактики профессиональных и экологически обусловленных заболеваний [17-21].

Таблица 1. Основные этапы научно-клинического становления и деятельности ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека»

Table 1. Key stages in the scientific and clinical development and activities of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology (FBUN)

Этап	Ключевые направления	Практическое значение
1955-1965 гг.	Организация института; формирование отделов гигиены труда, предупредительного санитарного надзора, промышленной токсикологии, промышленно-санитарной химии и клинического направления [1, 7, 9-11].	Создание базы охраны здоровья работников нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности.
1966-1975 гг.	Комплексные исследования условий труда, санитарные правила, ПДК, проектная экспертиза, клиническое изучение профессиональной и производственно обусловленной патологии [2-4].	Переход от описательной гигиены к нормативно-методическому и профилактическому сопровождению промышленных предприятий.

1970-е гг.	Оценка инженерно-технических мероприятий, герметизация оборудования, вентиляция, замена токсичных реагентов, снижение загрязнения воздуха рабочей зоны [4, 5].	Доказательство эффективности инженерной профилактики и связи гигиенических исследований с реальным снижением профессионального риска.
1976-1980-е гг.	Крупные комплексные исследования в нефтяной, нефтеперерабатывающей, нефтехимической, газовой промышленности; развитие токсикологических, экологических и клинических направлений [5-7].	Расширение роли института как научного и организационно-методического центра медицины труда.
1980-е-1990-е гг.	Диспансерное наблюдение, профпатологическая помощь, учет профессиональных заболеваний, взаимодействие с органами здравоохранения и санитарного надзора [7, 9-11].	Формирование специализированной медицинской и экспертной помощи работающему населению.
2000-е гг. - настоящее время	Оценка профессиональных и экологических рисков, биомониторинг, молекулярно-генетические и токсикологические исследования, профессиональная	Переход к риск-ориентированной и персонализированной профилактике профессиональных и экологически обусловленных

	аллергология и ранняя диагностика нарушений здоровья [8-11, 13-21].	заболеваний.
--	---	--------------

Список литературы:

1. Мухаметова Г.М., ред. Гигиена труда и охрана здоровья рабочих в нефтяной и нефтехимической промышленности. Т. III. Уфа: Башкирское книжное издательство; 1967:3-7.
2. Мухаметова Г.М. Гигиена труда и охрана здоровья рабочих в нефтяной и нефтехимической промышленности. Т. VI. Уфа; 1971:3-11.
3. Мухаметова Г.М. Гигиена труда и охрана здоровья рабочих в нефтяной и нефтехимической промышленности. Т. IX. Москва; 1976.
4. Мухаметова Г.М. Гигиена труда и охрана здоровья рабочих в нефтяной и нефтехимической промышленности. Т. VIII. Москва; 1975:3-10.
5. Карамова Л.М. Гигиена труда и охрана здоровья рабочих в нефтяной и нефтехимической промышленности. Т. XII. Москва; 1982:3-16.
6. Газизов М.Ф. Гигиена производственной и окружающей среды, охрана здоровья рабочих в нефтегазодобывающей и нефтехимической промышленности. Т. 15. Москва; 1985.
7. Бакиров А.Б. Итоги и перспективы деятельности Федерального бюджетного учреждения науки «Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека». Медицина труда и экология человека. 2015;(3):14-22.
8. Бакиров А.Б., Гимранова Г.Г. Основные результаты отраслевой научно-исследовательской программы «Гигиеническое обоснование минимизации рисков для здоровья населения России» (2011–2015 гг.) по итогам 2014 года. Медицина труда и экология человека. 2015;(3):23-32.
9. Бакиров А.Б. 65 лет на страже трудоспособного населения. Медицина труда и экология человека. 2020.
10. Шайхлисламова Э.Р., Бакиров А.Б., Гимранова Г.Г., Сулейманов Р.А., Валеев Т.К. Опыт работы Уфимского НИИ медицины труда и экологии человека в вопросах охраны здоровья населения в Республике Башкортостан. Медицина труда и экология человека. 2024;(3):6-11. doi: 10.24412/2411-3794-2024-10301.
11. Шайхлисламова Э.Р., Бакиров А.Б., Бактыбаева З.Б. О результатах научной и практической деятельности ФБУН «Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека». Медицина труда и экология человека. 2022;(3). doi: 10.24412/2411-3794-2022-10303.
12. Бакиров А.Б., Карамова Л.М., Каримова Л.К., Власова Н.В., Шаповал И.В., Башарова Г.Р. Современные проблемы производственного травматизма со

смертельным исходом. Обзор литературы. Медицина труда и экология человека. 2024;(1):25-48. doi: 10.24412/2411-3794-2024-10102.

13. Шайхлисламова Э.Р., Бакиров А.Б., Каримова Л.К., Ильина Л.А., Мулдашева Н.А., Шаповал И.В. Здоровье работающего населения Республики Башкортостан: состояние и пути его сохранения. Медицина труда и экология человека. 2024;(2):84-91. doi: 10.24412/2411-3794-2024-10206.

14. Кудояров Э.Р., Иванова Д.П., Бакиров А.Б., Калимуллина Д.Х. Неалкогольная жировая болезнь печени у лиц трудоспособного возраста. Медицина труда и экология человека. 2024;(2):92-109.

15. Бакиров А.Б., Каримова Л.К., Шаповал И.В., Мулдашева Н.А., Гимаева З.Ф., Кабирова Э.Ф. Внезапная смерть на рабочем месте от общих заболеваний: факторы риска, обоснование профилактических мероприятий по ее снижению. Медицина труда и экология человека. 2024;(3):78-91. doi: 10.24412/2411-3794-2024-10305.

16. Каримова Л.К., Бакиров А.Б., Гимаева З.Ф., Мулдашева Н.А., Шайхлисламова Э.Р., Абдрахманова Е.Р. Внезапная смерть на рабочем месте от общего заболевания. Меры профилактики. Медицина труда и экология человека. 2020;(4):41-44. doi: 10.24412/2411-3794-2020-10406.

17. Каримова Л.К., Мулдашева Н.А., Шаповал И.В., Фагамова А.З., Ильина Л.А., Волгарева АД, и др. Оценка риска нарушения здоровья работников, занятых в различных отраслях экономики Республики Башкортостан. Медицина труда и экология человека. 2022;(1):177-192. doi: 10.24411/2411-3794-2022-10112.

18. Шайхлисламова Э.Р., Каримова Л.К., Мулдашева Н.А., Бейгул Н.А., Шаповал И.В., Маврина Л.Н., и др. Оценка вредных факторов на рабочих местах и профессиональная заболеваемость работников предприятия по добыче полиметаллических руд. Медицина труда и экология человека. 2025;1(41):6-21. doi: 10.24412/2411-3794-2025-10101.

19. Каримова Л.К., Ауст А.Ю., Кабирова Э.Ф., Гимаева З.Ф., Мулдашева Н.А., Шаповал И.В., и др. Предикторы внезапной сердечной смерти у работников, занятых на различных производствах. Медицина труда и экология человека. 2025;1(41):37-48. doi: 10.24412/2411-3794-2025-10103.

20. Гайнуллина М.К., Валеева Э.Т., Карамова Л.М., Сафин В.Ф., Каримова Ф.Ф. Профессиональный риск здоровью женщин, занятых на производствах с вредными условиями труда. Медицина труда и промышленная экология. 2024;64(3):182-188. doi: 10.31089/1026-9428-2024-64-3-182-188.

21. Валеева Э.Т., Галимова Р.Р., Гайнуллина М.К., Дистанова А.А. Производственно обусловленная патология у работников автомобилестроения вследствие воздействия физических факторов и тяжести трудового процесса. Медицина труда и экология человека. 2025;(3):104-117. doi: 10.24412/2411-3794-2025-10307.

References:

1. Mukhametova G.M., ed. Occupational health and health protection of workers in the oil and petrochemical industry. Vol. 3. Ufa: Bashkirskoe knizhnoe izdatelstvo; 1967:3-7. (In Russ.)
2. Mukhametova G.M. Occupational health and health protection of workers in the oil and petrochemical industry. Vol. 6. Ufa; 1971:3-11. (In Russ.)
3. Mukhametova G.M. Occupational health and health protection of workers in the oil and petrochemical industry. Vol. 9. Moscow; 1976. (In Russ.)
4. Mukhametova G.M. Occupational health and health protection of workers in the oil and petrochemical industry. Vol. 8. Moscow; 1975:3-10. (In Russ.)
5. Karamova L.M. Occupational health and health protection of workers in the oil and petrochemical industry. Vol. 12. Moscow; 1982:3-16. (In Russ.)
6. Gazizov M.F. Industrial and environmental hygiene, occupational health of workers in the oil and gas extraction and petrochemical industries. Vol. 15. Moscow; 1985: 1-10. (In Russ.)
7. Bakirov A.B. Results and prospects of the Federal Budgetary Institution of Science "Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology". *Medsina truda i ekologiya cheloveka*. 2015;(3):14-22. (In Russ.)
8. Bakirov A.B., Gimranova G.G. The main results of the industry research program "Hygienic substantiation of minimizing health risks for the population of Russia" (2011-2015) following the results of 2014. *Medsina truda i ekologiya cheloveka*. 2015;(3):23-32. (In Russ.)
9. Bakirov A.B. 65 years on guard of the working-age population. *Medsina truda i ekologiya cheloveka*. 2020. (In Russ.)
10. Shaikhislamova E.R., Bakirov A.B., Gimranova G.G., Suleymanov R.A., Valeev T.K. Experience of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology in public health protection in the Republic of Bashkortostan. *Medsina truda i ekologiya cheloveka*. 2024;(3):6-11. (In Russ.) doi: 10.24412/2411-3794-2024-10301.
11. Shaikhislamova E.R., Bakirov A.B., Baktybaeva Z.B. On the results of scientific and practical activities of the FBIS "Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology". *Medsina truda i ekologiya cheloveka*. 2022;(3). (In Russ.) doi: 10.24412/2411-3794-2022-10303.
12. Bakirov A.B., Karamova L.M., Karimova L.K., Vlasova N.V., Shapoval I.V., Basharova G.R. Modern problems of fatal occupational injuries. Literature review. *Medsina truda i ekologiya cheloveka*. 2024;(1):25-48. (In Russ.) doi: 10.24412/2411-3794-2024-10102.
13. Shaikhislamova E.R., Bakirov A.B., Karimova L.K., Ilina L.A., Muldasheva N.A., Shapoval I.V. Health of the working population of the Republic of Bashkortostan: condition and ways to preserve it. *Medsina truda i ekologiya cheloveka*. 2024;(2):84-91. (In Russ.) doi: 10.24412/2411-3794-2024-10206.
14. Kudoyarov E.R., Ivanova D.P., Bakirov A.B., Kalimullina D.Kh. Non-alcoholic fatty liver disease in people of working age. *Medsina truda i ekologiya cheloveka*. 2024;(2):92-109. (In Russ.)

15. Bakirov A.B., Karimova L.K., Shapoval I.V., Muldasheva N.A., Gimaeva Z.F., Kabirova E.F. Sudden death at the workplace from common diseases: risk factors, rationale for preventive measures to reduce it. *Meditcina truda i ekologiya cheloveka*. 2024;(3):78-91. (In Russ.) doi: 10.24412/2411-3794-2024-10305.
16. Karimova L.K., Bakirov A.B., Gimaeva Z.F., Muldasheva N.A., Shaikhislamova E.R., Abdrakhmanova E.R. Sudden death at the workplace from a common disease. Preventive measures. *Meditcina truda i ekologiya cheloveka*. 2020;(4):41-44. (In Russ.) doi: 10.24412/2411-3794-2020-10406.
17. Karimova L.K., Muldasheva N.A., Shapoval I.V., Fagamova A.Z., Ilin L.A., Volgareva A.D., et al. Assessment of the risk of health disorders in workers employed in various sectors of the economy of the Republic of Bashkortostan. *Meditcina truda i ekologiya cheloveka*. 2022;(1):177-192. (In Russ.) doi: 10.24411/2411-3794-2022-10112.
18. Shaikhislamova E.R., Karimova L.K., Muldasheva N.A., Beygul N.A., Shapoval I.V., Mavrina L.N., et al. Assessment of harmful factors in the workplace and occupational morbidity of workers at a polymetallic ore mining enterprise. *Meditcina truda i ekologiya cheloveka*. 2025;1(41):6-21. (In Russ.) doi: 10.24412/2411-3794-2025-10101.
19. Karimova L.K., Aust A.Yu., Kabirova E.F., Gimaeva Z.F., Muldasheva N.A., Shapoval I.V., et al. Predictors of sudden cardiac death in workers employed in various industries. *Meditcina truda i ekologiya cheloveka*. 2025;1(41):37-48. (In Russ.) doi: 10.24412/2411-3794-2025-10103.
20. Gainullina M.K., Valeeva E.T., Karamova L.M., Safin V.F., Karimova F.F. Occupational health risk for women employed in industries with harmful working conditions. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2024;64(3):182-188. (In Russ.) doi: 10.31089/1026-9428-2024-64-3-182-188.
21. Valeeva E.T., Galimova R.R., Gainullina M.K., Distanova A.A. Work-related pathology among automotive industry workers due to exposure to physical factors and the severity of the work process. *Meditcina truda i ekologiya cheloveka*. 2025;(3):104-117. (In Russ.) doi: 10.24412/2411-3794-2025-10307.

Информация об авторах

Эльмира Радиковна Шайхлисламова - кандидат медицинских наук, директор ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», доцент кафедры терапии и профессиональных болезней, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России, 450106, г. Уфа, Россия, e-mail: shajkh.ehlmira@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6127-7703>.

Ахат Бариевич Бакиров - доктор медицинских наук, профессор, советник директор ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», заведующий кафедрой терапии и профессиональных болезней ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России, e-mail: akhatb@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3510-2595>.

Алла Ивановна Борисова - кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник отдела медицины труда ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail: alla.borisova.ufa@gmail.com, +7(919)153-28-96, <https://orcid.org/0000-0001-8618-8005>

Лена Мирзаевна Карамова - доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник отдела медицины труда ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail: bashdoc@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0857-1150>.

Галина Ганиновна Гимранова - доктор медицинских наук, доцент, главный научный сотрудник отдела медицины труда ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail: gala.gim@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8476-1223>.

Махмуза Калимовна Гайнуллина - доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела медицины труда ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail: gainullinamk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9340-2284>.

Елена Рафиловна Абдрахманова - кандидат медицинских наук, заместитель директора по научной и организационно-методической работе ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», доцент кафедры терапии и профессиональных болезней, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет», e-mail: elenara@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2763-1358>.

Эльвира Тимерьяновна Валеева – доктор медицинских наук, главный научный сотрудник отдела медицины труда ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», профессор кафедры терапии и профессиональных болезней ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России, e-mail: oozr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9146-5625>.

Динис Маратович Сайфуллин - обучающийся ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России, e-mail: dinis.sayfullin@gmail.com

Искандер Илдарович Зайдуллин – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом медицины труда ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail: iskanderdent@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-6031-5683>.

Расима Расиховна Галимова – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник отдела медицины труда ФБУН Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека, доцент кафедры терапии и профессиональных болезней, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России; e-mail: rasima75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4658-545X>

Эльвира Филаретовна Кабировва - заведующий отделением профессиональной аллергологии и иммунореабилитации ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail: idehlvira@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6992-096X>.

Author information

Elmira R. Shaikhislamova - Candidate of Medical Sciences, Director, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Associate Professor, Department of Therapy and Occupational Diseases, Bashkir State Medical University of the Ministry of Health of Russia, 450106, Ufa, Russia, e-mail: shajkh.ehlmira@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6127-7703>.

Akhat B. Bakirov - Doctor of Medical Sciences, Professor, Advisor to the Director, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Head of the Department, Department of Therapy and Occupational Diseases, Bashkir State Medical University, e-mail: akhatb@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3510-2595>.

Alla I. Borisova - Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, Department of Occupational Medicine, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail: alla.borisova.ufa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8618-8005>; 8-919-153-28-96.

Lena M. Karamova - Doctor of Medical Sciences, Professor, Chief Researcher, Department of Occupational Medicine, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail: bashdoc@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0857-1150>.

Galina G. Gimranova - Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher, Department of Occupational Medicine, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail: gala.gim@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8476-1223>.

Makhmuza K. Gainullina - Doctor of Medical Sciences, Professor, Leading Researcher, Department of Occupational Medicine, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail: gainullinamk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9340-2284>.

Elena R. Abdrakhmanova - Candidate of Medical Sciences, Deputy Director for Scientific, Organizational and Methodological Work, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Associate Professor, Department of Therapy and Occupational Diseases, Bashkir State Medical University, e-mail: elenara@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2763-1358>.

Elvira T. Valeeva - Doctor of Medical Sciences, Chief Researcher, Department of Occupational Medicine, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Professor, Department of Therapy and Occupational Diseases, Bashkir State Medical University of the Ministry of Health of Russia, e-mail: oozr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9146-5625>.

Dinis M. Saifullin - Student, Bashkir State Medical University of the Ministry of Health of Russia, e-mail: dinis.sayfullin@gmail.com.

Iskander I. Zaidullin - Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of Occupational Medicine, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail: iskanderdent@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-6031-5683>.

Rasima R. Galimova - Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, Department of Occupational Medicine, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Associate Professor, Department of Therapy and Occupational Diseases, Bashkir State Medical University of the Ministry of Health of Russia, e-mail: rasima75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4658-545X>.

Elvira F. Kabirova - Head of the Department of Occupational Allergology and Immunorehabilitation, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail: idehlvira@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6992-096X>.

Поступила/Received: 18.08.2026

Принята в печать/Accepted: 27.08.2026

УДК 612.014.43

ЗАЩИТА РАБОТАЮЩЕГО НАСЕЛЕНИЯ ЮЖНЫХ РЕГИОНОВ ОТ НЕГАТИВНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА. ПРОФИЛАКТИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ

Лосик Т.К., Конюхов А.В.

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда
имени академика Н.Ф. Измерова», Москва, Российская Федерация

Изменение климата, в настоящее время, связано с глобальным потеплением – всё чаще публикуются материалы, свидетельствующие о росте атмосферной температуры, учащением экстремальных погодных явлений и повышением уровня мирового океана. В Российской Федерации наибольший ущерб глобальное потепление наносит южным регионам страны. Последствия изменения климата сказывается на состоянии работников, вынужденных трудиться в жару или в нагревающих микроклиматических условиях. В тёплый период года длительное выполнение физической работы при высокой температуре воздуха с использованием необходимых средств индивидуальной защиты (СИЗ) невозможно.

Цель исследования: проведение обзора научных данных отечественных и зарубежных авторов с целью оценки и огласки мер по повышению адаптации к жарким условиям, минимизации профессиональных рисков и сохранения здоровья работников; определение значимых факторов трудового процесса в формировании тепловой нагрузки на организм человека в условиях потепления климата; комплекс профилактических мероприятий для поддержания теплового гомеостаза, улучшения самочувствия и укрепления здоровья работников.

Материалы и методы. Обзор выполнен с использованием контент-анализа с последующей классификацией и систематизацией данных исследований – оригинальных статей и литературных обзоров, опубликованных за последние 30 лет и представленных в базах PubMed, Scopus, Google Scholar и eLIBRARY.RU. Поиск источников осуществлялся по ключевым словам: нагревающий микроклимат, глобальное потепление, перегрев организма, терморегуляторные реакции, прогнозирование теплового состояния, профилактика теплового удара и перегревания, средства индивидуальной защиты в нагревающем микроклимате, режим труда и отдыха в нагревающем микроклимате, питьевой режим и питание в нагревающем микроклимате. Приоритетными считались источники из

отечественных и зарубежных рецензируемых научных журналов, опубликованных за последние 10 лет, близкие по теме настоящего обзора.

Ключевые слова: изменение климата; терморегуляция; средства индивидуальной защиты; тепловые расстройства; режим труда и отдыха; тепло-влагообмен; водно-электролитный обмен.

Соблюдение этических стандартов: данное исследование не требует заключения этического комитета или других документов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Лосик Т.К., Конюхов А.В. Защита работающего населения южных регионов от негативных последствий изменений климата. Профилактические мероприятия. Медицина труда и экология человека. 2026; 3:26-46.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10302>

Для корреспонденции: Алексей Владимирович Конюхов, e-mail: epidemiologist@iriokh.ru

PROTECTING THE WORKING POPULATION OF THE SOUTHERN REGIONS FROM THE NEGATIVE CONSEQUENCES OF CLIMATE CHANGE. PREVENTIVE MEASURES

Tatyana K. Losik, Alexey V. Konyuhov

Izmerov Research Institute of Occupational Health, Moscow, Russian Federation

Climate change is currently associated with global warming. Data demonstrating rising atmospheric temperatures, more frequent extreme weather events, and rising sea levels are increasingly being published. In the Russian Federation, global warming is causing the greatest damage to the country's southern regions. The consequences of climate change impact workers forced to work in hot weather or in warming microclimatic conditions. In these climatic and geographical conditions, prolonged physical work at high temperatures during the warm season requires the use of the necessary personal protective equipment (PPE) is impossible.

The purpose of the study. A review of scientific data from domestic and international authors was conducted to evaluate and publicize measures to improve adaptation to hot conditions, minimize occupational risks, and maintain worker health. Significant work-related factors influencing the heat load on the human body in a warming climate were identified. A set of preventive measures has been proposed to maintain thermal homeostasis, improve the well-being, and strengthen the health of employees.

Materials and methods. The review was conducted using content analysis, followed by classification and systematization of research data – original articles and literature reviews published over the past 30 years and available in the PubMed, Scopus, Google Scholar, and eLIBRARY.RU databases. The search was conducted using the following keywords: heating microclimate, global warming, body overheating, thermoregulatory responses, predicting thermal conditions, preventing heat stroke and overheating, personal protective equipment in a heating microclimate, work and rest patterns in a heating microclimate, and drinking and nutrition in a heating microclimate. The sources from domestic and foreign peer-reviewed scientific journals published over the past 10 years, which are close to the topic of this review, were considered to be of priority.

Keywords: climate change; thermoregulation; personal protective equipment; heat disorders; work and rest regime; heat and moisture exchange; water and electrolyte metabolism

Compliance with ethical standards: this study does not require approval from an ethics committee or other documents.

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

Funding: The study did not have sponsorship.

For citation: Losik T.K., Konyuhov A.V. Protecting the working population of the southern regions from the negative consequences of climate change. Preventive measures. Occupational health and human ecology. 2026; 3 : 26-46.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10302>

For correspondence: Alexey V. Konyuhov, e-mail: epidemiologist@irioh.ru

Изменение климата на нашей планете непосредственно связано с продолжающимся глобальным потеплением [1,2]. Имеющиеся научные сведения по влиянию изменений климатических условий на здоровье жителей южных регионов Российской Федерации, занятых в различных сферах народного

хозяйства, разнообразны, иногда несопоставимы и даже противоречивы. Влияние изменения климата неоднозначно и включает в себя как благоприятные, так и неблагоприятные последствия, варьирующиеся в зависимости от региона и фактора. [3,4]. Жители Астраханской, Волгоградской, Самарской и Ростовской областей, Калмыкии, Ставрополья, республик Северного Кавказа, Татарстана, Башкортостана и др., занятых в различных отраслях промышленности, всё чаще сталкиваются со знойным, жарким, засушливым и продолжительным летним сезоном [5,6]. В таких климатогеографических условиях физическая активность в тёплое время года при высоких температурах окружающей среды (по данным метеослужбы достигает **+44°C на открытой территории, а при наличии инсоляции – более +50°C**), при использовании СИЗ, оказывает влияние на функциональную эффективность систем организма, ответственных за поддержание теплового гомеостаза [7].

На сегодняшний день количественно оценить влияние потепления климата на условия работы и качество жизни и здоровья людей, увеличение показателей заболеваемости в т.ч. наиболее уязвимых групп населения (пожилых людей, с недостаточной физической подготовкой и акклиматизацией, особенно страдающих хроническими заболеваниями: ожирение, сахарный диабет, сердечная-сосудистая недостаточность, алкоголизм, деменция, а также лиц, применяющих медикаменты, влияющих на терморегуляцию) сложно.

В целях снижения негативного влияния на состояние здоровья трудового населения южных регионов Российской Федерации в условиях наблюдающихся климатических изменений, требуется комплексный подход, включающий внедрение профилактических мероприятий, ориентированных на снижение рисков для здоровья.

Негативные последствия для организма. При выполнении работы в нагревающей среде нагрузка на организм отражается в степени выраженности изменений физиологических реакций, а также может сопровождаться ухудшением самочувствия и на состоянии здоровья, в т.ч. в развитии различных тепловых расстройств: тепловой обморок (тепловой коллапс), тепловой отек, тепловые судороги, тепловое истощение и тепловой удар [8].

Воздействие повышенной температуры окружающей среды способно вызвать нарушения в нейроэндокринной регуляции и водно-электролитном обмене, стимулирует перекисное окисление липидов, нарушает стабильность клеточных мембран, провоцирует тканевую гипоксию, что в итоге приводит к

метаболическим изменениям и снижению неспецифической резистентности организма [9,10]. Наблюдаются существенные изменения в работе кардиореспираторной системы, которая имеет ключевое значение для теплообмена человека с окружающей средой. На теплообмен и тепловое состояние работников в условиях нагревающей среды, помимо климатических факторов (температура, скорость движения и влажность воздуха, инсоляция), длительности их воздействия и уровня энергозатрат, значительное влияние способны оказывать средства индивидуальной защиты, применяемые для защиты от вредных и опасных производственных факторов. [11-14]. Теплофизические характеристики материалов, из которых изготовлены средства индивидуальной защиты, а также их конструктивные особенности, влияющие на теплообмен с окружающей средой, способны значительно ухудшать тепловое состояние человека.

Наиболее выраженное ухудшение теплового состояния отмечается при применении средств индивидуальной защиты из материалов, не пропускающих воздух и влагу, и обладающих низкой гигроскопичностью несмотря на то, что именно такие материалы наилучшим образом соответствуют предъявляемым требованиям по защите от вредных производственных факторов. При этом в научной литературе практически не представлены данные о том, насколько каждый из указанных параметров влияет на формирование тепловой нагрузки на организм. Такая информация необходима для обоснованного подбора материалов, способствующих оптимизации тепло- и влагообмена между человеком и окружающей средой. Например, при защите от химических или биологических факторов нередко используют материалы с низкой воздухо- и влагопроводностью, которые ограничивают либо полностью исключают потери тепла за счёт испарения влаги [12,14,15]. Именно этот механизм теплоотдачи играет ключевую роль в поддержании температурного гомеостаза в условиях нагревающей среды. Повысить степень воздухо- и влагонепроницаемости материалов позволяют специальные пропитки, применяемые при производстве средств индивидуальной защиты для обеспечения безопасности человека от вредных производственных факторов [16]. Поэтому для корректной оценки воздействия термических параметров окружающей среды на организм работников и их нормативного регулирования необходимо установить, насколько существенно средства защиты влияют на формирование теплового состояния человека [11,17].

СИЗ, обуславливая различную степень напряжения терморегуляторных реакций, оказывает влияние на формирование класса условий труда. Так при температуре воздуха 30°C диапазон классов составляет 3.1-3.3, а при температуре воздуха 35°C – 3.1-3.4 [18]. Это означает, что при оценке условий труда и риска перегревания организма необходимо учитывать вид и степень защиты спецодежды¹.

Прогнозирование теплового состояния. Анализ и прогнозирование теплового состояния человека работающего в нагревающей среде ($T_B = 25-35^\circ\text{C}$) и применяющего СИЗ от вредных производственных факторов, возможен с использованием математических моделей, демонстрирующих связь между показателями теплового и функционального состояния организма и совокупностью факторов, которые формируют тепловую нагрузку (теплофизические свойства материалов СИЗ, климатические параметры и уровень физической активности). [18,19]. Выявленные зависимости дают возможность рассчитывать допустимую продолжительность работы в конкретных производственных условиях, а также проводить подбор материалов с учётом гигиенических требований. Принимая во внимание различные значения показателей климата, теплофизических характеристик материалов, уровня физической активности человека и длительности непрерывной работы, используя следующие уравнения (1-5), можно рассчитать и сделать прогноз о величине критериальных показателях теплового состояния человека – теплосодержания ($Q_{тс}$, кДж/кг), средневзвешенной температуре кожи ($T_{кcv}$, °C), температуре тела (T_T , °C), частоте сердечных сокращений (ЧСС, уд/мин), теплоощущений (T_0 , балл). Это позволит подобрать или изготовить СИЗ, способными обеспечить лучший тепло- и влагообмен человека с окружающей средой и продлить продолжительность работы в нагревающих условиях.

$$Q_{тс} = 113,8975 + 0,1068q_m + 0,0591\tau + 0,2658T_B - 0,0251П + 0,0157\phi - 0,4804V + 0,0107Г \quad (1)$$

где: q_m – мощность работы, Вт;

τ – время выполнения работы в заданных условиях, мин;

T_B – температура воздуха, °C;

¹ Методы контроля. Физические факторы. Методические указания. Интегральная оценка нагревающего микроклимата. МУК 4.3.2755-10 (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 12.11.2010)

Π – паропроницаемость используемой одежды, г/м²ч;

φ – относительная влажность воздуха, %;

V – скорость движения воздуха, м/с;

Γ – гигроскопичность используемой одежды (при $\varphi=65\%$), %.

Повышение паропроницаемости и гигроскопичности материала ведёт к уменьшению тепловой нагрузки, испытываемой организмом, о чём свидетельствуют изменения температуры кожи и тела.

$$T_{КСВ} = 25,922 + 0,24879T_B + 0,02157\varphi + 0,02424q_M + 0,00665\Gamma - 0,02356\Pi + 0,01857\tau \quad (2)$$

$$T_T = 35,5792 - 0,00249\Pi - 0,00487\Gamma + 0,01040\tau + 0,01046\varphi - 0,04245V \quad (3)$$

Одним из информативных показателей функционального состояния человека является ЧСС. Согласно уравнению (4), рост ЧСС происходит при увеличении температуры воздуха и его относительной влажности в результате физиологических компенсаторных механизмов организма – уравнение описывает данную закономерность [20].

$$ЧСС = 22,9383 + 0,63203\varphi + 0,42356\tau + 1,84458T_B - 0,20972\Pi + 0,15535V - 0,35752\Gamma \quad (4)$$

где: V – воздухопроницаемость используемой одежды, дм³/м²с.

$$T_o = 1,37186 + 0,00174V - 0,0087\Pi - 0,01380\Gamma + 0,03244\tau - 0,012742q_M + 0,142177T_B + 0,009479\varphi + 0,29738V \quad (5)$$

На основании полученных математических зависимостей открывается возможность проведения оценки значимости отдельных теплофизических свойств материалов, используемых в СИЗ, с точки зрения их вклада в формирование термической нагрузки на организм.

Профилактические мероприятия. При подборе материалов для производства СИЗ рекомендуется отдавать приоритет тем, которые обладают следующими свойствами: паропроницаемостью, гигроскопичностью и достаточной вентиляцией пододёжного пространства [21]. Вентиляция может обеспечиваться путем применения материалов с необходимой воздухопроницаемостью, правильным выбором конструкции СИЗ, и применением в них специальных вентиляционных устройств и отверстий [22-24]. Надлежащая вентиляция пододёжного пространства увеличивает теплоотдачу испарением и тем самым способствует улучшению теплового состояния организма [23-25]. Для эффективного отвода тепла важно, чтобы одежда не прилегала плотно к телу, а образовывала воздушную прослойку. Это позволяет испаряться влаге с кожи, что позволяет телу охлаждаться [26].

Жаркая погода ухудшает условия труда работников, занятых на открытых площадках, а также в производственных и общественных помещениях, где отсутствуют эффективные системы кондиционирования [27]. Терморегуляторные реакции женщин при работе в нагревающей среде имеют отличительную особенность – специфику потоотделительной функции. Она проявляется в двух аспектах: более низкой интенсивности потоотделения и задержке его начала. Эти особенности приводят к усиленному накоплению тепла преимущественно в периферических тканях («оболочке» тела) и вызывают повышенное напряжение сердечно-сосудистой системы. [28, 29]. Тем не менее у женщин при продолжительном воздействии термической нагрузки наблюдается снижение уровня метаболизма, что неизбежно влияет на их тепловой баланс – это обусловлено спецификой механизмов поддержания температурного гомеостаза в женском организме [30]. В связи с этим представляется обоснованным разрабатывать СИЗ от повышенных температур (или для работ в условиях нагревающего микроклимата) с учётом дифференцированного подхода к потребностям мужчин и женщин.

Использование СИЗ с элементами охлаждения также способно решать проблему перегрева работников в нагревающем микроклимате. Имеющиеся варианты систем охлаждения специальной одежды и средств защиты: активные

(воздушные, водные) [31-35] и пассивные (конвекционные отверстия, ткани с отсутствием теплонакопления и теплопроводности из внешней среды и высокой теплопроводности из внутренней среды) [31, 33] могут стать наиболее предпочтительным и эффективным способом борьбы с перегревом работников, но при соответствии таких СИЗ требованиям безопасности на предприятиях.

Ещё одним способом обеспечения оптимального или допустимого теплового состояния человека может быть регламентация периодов работы в неблагоприятном микроклимате и отдыха в помещении с его оптимальными параметрами. Если температура воздуха равна 28,5°C, рекомендуется сокращать продолжительность рабочего дня на один час. При росте температуры воздуха до 29 °C продолжительность непрерывной работы следует сократить на два часа, а при температуре 30,5 °C – на четыре часа. Не рекомендуется проведение работ на открытом воздухе при его температуре 32,5°C. Следует изменить порядок рабочего дня, перенося такие работы на утренние или вечерние часы. При экстренно-срочных работах на открытом воздухе и температуре 32,5°C и выше продолжительность периодов непрерывной работы должна составлять 15-20 минут с последующей продолжительностью отдыха не менее 10-12 минут. При этом общая допустимая продолжительность воздействия термической нагрузки в течение рабочей смены не должна превышать 4-5 часов для работников, использующих специальную одежду, защищающую от теплового излучения, и 1,5-2 часа – для тех, кто такой одежды не применяет².

Выполнение трудовой деятельности в условиях нагревающего микроклимата напрямую связано с обильным потоотделением и повышением утраты жидкости через дыхательные пути [36]. Для сохранения здоровья и работоспособности необходимо восполнять потери жидкости, солей, микроэлементов и витаминов, которые выводятся с потом чтобы предотвратить нарушение водного баланса и электролитов организма при повышенной температуре воздуха. В человеческом поте содержатся соли калия, натрия, фосфора, кальция, микроэлементы, такие как железо, магний, медь, цинк и йод, а также витамины [8, 37, 38]. Несмотря на значительную потерю натрия и хлора с потом, увеличивать потребление поваренной соли не требуется, так как организм способен реабсорбировать часть этих веществ [39] и, в среднем, потребление человеком соли довольно велико [3, 40]. Необходимо также учитывать, что организм адаптируется к жаркому климату,

² Информация Роспотребнадзора от 28.06.2022 "О рекомендациях для работающих в условиях повышенных температур воздуха"

и это отражается на составе пота – у акклиматизированных лиц в нём меньше микроэлементов, чем у неакклиматизированных [3, 41, 42].

Современная пищевая промышленность производит напитки, содержащие витаминно-минеральный комплекс, предназначенный для восстановления водно-солевого баланса, устранения дефицита витаминов, поддержки иммунной системы, а также для нормализации работы сердечно-сосудистой и нервной систем и обмена веществ, что способствует повышению тонуса организма [43]. Для сохранения здоровья и работоспособности, а также поддержания иммунитета рекомендуется употреблять разнообразные напитки, богатые полезными веществами: чай, минеральную воду, изотонические или витаминизированные напитки, или содержащие умеренное количество органических кислот (лимонной, пировиноградной, аскорбиновой, молочной, янтарной). Также могут быть полезны фруктовые и ягодные отвары, морсы, компоты, натуральные соки без сахара, настой шиповника и молочнокислые продукты (обезжиренное молоко, пахта, сыворотка), которые содержат микроэлементы, витамины и необходимые минералы [44-46]. Согласно исследованиям, сладкие напитки, включая газированные воды и соки, не только не утоляют жажду, но и могут её усиливать. Кроме того, высокое содержание сахара в них способствует повышению температуры тела [47-49]. Не рекомендуется также употреблять дистиллированную или деионизированную воду [50]. Не следует принимать кофе и кофейные напитки для регидратации: он не только выводит жидкость из организма, но и создает дополнительную нагрузку на сердечно-сосудистую систему [51]. Употребление алкогольных напитков полностью недопустимо [52]. Для лучшего восполнения витаминов, минералов и микроэлементов, стоит разнообразить свой питьевой режим. Однако, особенно в жаркую погоду, лучше пить воду или любой прохладительный напиток, чем оставаться без жидкости вообще. Устройства питьевого обеспечения должны быть максимально приближены к рабочим местам. Питьевой режим должен быть регулярным, но не обильным, чтобы поддерживать гидратацию организма на физиологическом уровне. При этом рекомендуемая температура питьевой жидкости должна быть $+10-15^{\circ}\text{C}^2$. В условиях жары или нагревающего микроклимата при составлении пищевых рационов для работников рекомендуется выбирать лёгкие и водянистые продукты (плодоовощную продукцию, ягоды, зелень). Для обеспечения питания в условиях жаркой погоды подойдут: холодные супы, нежирное мясо, яйца, рыба и морепродукты [53].

В условиях нагревающего микроклимата работа организма, направленная на поддержание температурного гомеостаза, требует значительных усилий от различных систем³. Для своевременного выявления нарушений здоровья работников и принятия необходимых мер по профилактике и их лечению необходим регулярный медицинский контроль соответствующими специалистами (периодический медицинский осмотр) особенно тех групп, кто находится в группе повышенного риска³. При выполнении работ, характеризующихся существенным тепловым воздействием на организм человека (повышенная температура воздуха, интенсивная физическая активность, применение спецодежды с ограниченной воздухопроницаемостью), способным вызвать повышение температуры тела выше допустимых значений, обязательным является осуществление медицинского контроля за состоянием здоровья работников в течение всего рабочего времени⁴. Однако по-прежнему мониторинг температурных параметров и оценка функциональной готовности персонала на рабочих местах с принятием соответствующих мер служат действенным инструментом для контроля рисков и сохранения здоровья и трудового долголетия человека.

Заключение. Проблема защиты здоровья работников от негативного воздействия меняющегося климата, в особенности в южных регионах Российской Федерации – важная задача в области медицины, биологии и социальной сферы. В условиях нагревающего климата поддержание нормальной температуры тела требует не только внутренних резервов организма, но и применения индивидуальных и коллективных средств защиты.

Колебания температуры, уровня относительной влажности и скорости движения воздуха, и связанными с ними эффекты (волны жары и холода, засухи, лесные пожары и наводнения, распространение инфекционных заболеваний, и, как следствие, вынужденная миграция) обуславливают необходимость научно обоснованных мероприятий по защите населения от негативных последствий изменения климата.

³ Приказ Минздрава РФ от 28.01.2021 N 29Н "Об утверждении Порядка проведения обязательных предварительных и периодических медицинских осмотров работников, предусмотренных частью четвертой статьи 213 Трудового кодекса Российской Федерации, Перечня медицинских противопоказаний к осуществлению работ с вредными и (или) опасными производственными факторами, а также работам, при выполнении которых проводятся обязательные предварительные и периодические медицинские осмотры"

⁴ Гигиена труда. Средства коллективной и индивидуальной защиты. Режимы труда и отдыха работающих в нагревающем микроклимате в производственном помещении и на открытой местности в теплый период года. Методические рекомендации. МР 2.2.8.0017-10 (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 28.12.2010)

В целях обеспечения нормального функционирования организма, сохранения здоровья и хорошего самочувствия работников, при решении практических вопросов, связанных с научной разработкой и применением профилактических мер необходимы:

- разработка рациональных комплектов СИЗ и безопасной продолжительности работ в нагревающей среде на основании математического моделирования. Модели учитывают влияние климатических факторов, свойств материалов СИЗ, физической активности, а также индивидуальные особенности теплового и функционального состояния организма мужчин и женщин;
- мониторинг динамики функционального состояния работников в связи с воздействием неблагоприятных климатических факторов, интенсивности труда и эффективности используемых СИЗ;
- проведение периодических медицинских осмотров работников, занятых на производствах, расположенных на территориях с экстремальными условиями климата с привлечением специалистов с высоким уровнем квалификации;
- восстановление нарушения водно-электролитного обмена, обусловленного повышенным потоотделением в организме в условиях нагревающей среды, потреблением жидкости, электролитов, микроэлементов и витаминов;
- подготовка рекомендаций по организации питания, которое будет соответствовать энергетическим затратам и содержать необходимое количество витаминов и минеральных веществ.

Участие авторов:

Лосик Т.К. – дизайн исследования, сбор материала, написание текста, редактирование;

Конюхов А.В. – сбор материала, написание текста, редактирование, работа с литературными источниками.

Author contributions:

Tatiana K. Losik – the concept and design of the study, collection and processing of material, writing a text, editing;

Alexey V. Konyuhov – collection and processing of material, writing a text, editing, work with literary sources.

Список литературы:

1. Гулёв С.К., Катцов В.М., Соломина О.Н. Глобальное потепление продолжается. *Вестник Российской академии наук*. 2008;78(1): 20-27.
2. Houghton J. Global warming. *Reports on Progress in Physics*. 2005;68(6): 1343. doi: 10.1088/0034-4885/68/6/R02
3. Оганесян В.В. Климатические изменения как факторы риска для экономики России. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2019;(3): 161-184.
4. Moore TG. Global warming: The good, the bad, the ugly and the efficient. *EMBO Reports*. 2008;9(S1): S41-S45. doi: 10.1038/embor.2008.53
5. Васильев Д.Ю., Семенов В.А., Чибилев А.А. Климатические изменения температурного режима на территории России в XX-начале XXI века. *География и природные ресурсы*. 2023;44(2): 15.
6. Mendelsohn R, Dinar A, Williams L. The distributional impact of climate change on rich and poor countries. *Environ Dev Econ*. 2006;11(2): 159-178. doi: 10.1017/S1355770X05002755
7. Афанасьева Р.Ф. Тепловая нагрузка среды и её влияние на организм. В кн.: Измеров Н.Ф., Денисов Э.И., Профессиональный риск для здоровья работников. М.: Тривант; 2003. С. 149-156.
8. Cocco A, et al. Criteria for a recommended standard: occupational exposure to heat and hot environments: DHHS (NIOSH) Publication; 2016 Feb. Publication Number 2016-106.
9. Ali MB, Hahn EJ, Paek KY. Effects of temperature on oxidative stress defense systems, lipid peroxidation and lipoxygenase activity in *Phalaenopsis*. *Plant Physiol Biochem*. 2005;43(3): 213-223. doi: 10.1016/j.plaphy.2005.01.007
10. Burtscher M, Gatterer H, Burtscher J, et al. Extreme terrestrial environments: life in thermal stress and hypoxia. A narrative review. *Front Physiol*. 2018;9: 572. doi: 10.3389/fphys.2018.00572
11. Афанасьева Р.Ф., Антонов А.Г., Лосик Т.К., и др. Об адекватной оценке нагревающего микроклимата при использовании работающими спецодежды, ухудшающих их тепловое состояние. *Медицина труда и промышленная экология*. 2005;(4): 8.
12. Davey SL, Lee BJ, Robbins T, et al. Heat stress and PPE during COVID-19: impact on healthcare workers' performance, safety and well-being in NHS settings. *Journal of Hospital Infection*. 2021;108: 185–188. doi: 10.1016/j.jhin.2020.11.027

13. Renberg J, Lignier MJ, Wiggen ØN, et al. Heat tolerance during uncompensable heat stress in men and women wearing firefighter personal protective equipment. *Applied Ergonomics*. 2022;101: 103702. doi: 10.1016/j.apergo.2022.103702
14. Potter AW, Gonzalez JA, Xu X. Ebola response: modeling the risk of heat stress from personal protective clothing. *PLoS ONE*. 2015;10(11): e0143461. doi: 10.1371/journal.pone.0143461
15. Kim DH, Lee JY. Heat strain while wearing pesticide protective clothing in hot environments: effects of textile physical properties and ambient humidity. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2023;93: 103388. doi: 10.1016/j.ergon.2022.103388
16. Dolez PI, Marsha S, McQueen RH. Fibers and textiles for personal protective equipment: review of recent progress and perspectives on future developments. *Textiles*. 2022;2(2): 349–381. doi: 10.3390/textiles2020020
17. Lin YC, Yeh YT, Chen CP. Thermoregulation in response to heat stress arising from wearing chemical protective clothing when performing cleaning and disinfection. *ISEE Conf Abstract*. 2024;2024(1).
18. Афанасьева Р.Ф., Лосик Т.К., Бессонова Н.А., и др. Прогнозирование влияния гигиенических свойств материалов спецодежды на функциональное состояние работающих в нагревающей среде. *Медицина труда и промышленная экология*. 2015;(9): 27-27.
19. Афанасьева Р.Ф., Прокопенко Л.В., Бессонова Н.А., и др. Влияние некоторых показателей теплофизических свойств материалов спецодежды на тепловое состояние работающих в нагревающей среде. *Медицина труда и промышленная экология*. 2015;(9): 28-28.
20. Смирнов А.А. Влияние высоких температур и влажности воздуха на скорость перегревания организма человека. *Гигиена и Санитария*. 1961;(10): 20-23.
21. Бурмистрова О.В., Лосик Т.К., Шупорин Е.С. Физиолого-гигиеническое обоснование разработки методики оценки спецодежды для защиты работающих в нагревающей среде по показателям теплового состояния. *Медицина труда и промышленная экология*. 2019;59(12): 1013-1019.
22. Коринтели А.М., Черунова И.В. Разработка и Исследование Вентилируемой Термостойкой Одежды. *Костюмология*. 2020;5(1): 18-18.
23. Zhao M, Gao C, Wang F, et al. A study on local cooling of garments with ventilation fans and openings placed at different torso sites. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2013;43(3): 232-237. doi: 10.1016/j.ergon.2013.01.001
24. Ruckman JE, Murray R, Choi HS. Engineering of clothing systems for improved thermophysiological comfort: the effect of openings. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 1999;11(1): 37 52. doi: 10.1108/09556229910258098

25. Ho C, Fan J, Newton E, et al. The effect of added fullness and ventilation holes in T shirt design on thermal comfort. *Ergonomics*. 2011;54(4): 403-410. doi: 10.1080/00140139.2011.556260
26. Pascoe DD, Shanley LA, Smith EW. Clothing and exercise: I. Biophysics of heat transfer between the individual, clothing and environment. *Sports Medicine*. 1994;18(1): 38-54. doi: 10.2165/00007256-199418010-00005
27. Lundgren K, Kuklane K, Gao C., et al. Effects of heat stress on working populations when facing climate change. *Industrial Health*. 2013;51(1): 3-15. doi: 10.2486/indhealth.2012-0089
28. Буронова С.Т. Физиологические Особенности Женского Организма. *Экономика и Социум*. 2022;2-1(93): 223-225.
29. Искандаров А.Б. Характеристика Показателей Терморегуляции У Работниц Трикотажных Производств. *Медицинские Новости*. 2019;8(299): 79-80.
30. Fernández Peña C, Reimúndez A, Viana F, et al. Sex differences in thermoregulation in mammals: implications for energy homeostasis. *Frontiers in Endocrinology*. 2023;14: 1093376. doi: 10.3389/fendo.2023.1093376
31. Lou L., Zhou Y., Yan Y., et al. Wearable cooling and dehumidifying system for personal protective equipment (PPE). *Energy and Buildings*. 2022;276: 112510. doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112510
32. Fadaei A. Ventilation systems and COVID-19 spread: evidence from a systematic review study. *European Journal of Sustainable Development Research*. 2021;5(2): 1-7. doi: 10.21601/ejosdr/10845
33. Lu Y, Wei F, Lai D, et al. A novel personal cooling system (PCS) incorporated with phase change materials (PCMs) and ventilation fans: an investigation on its cooling efficiency. *Journal of thermal biology*. 2015;52: 137-146. doi: 10.1016/j.jtherbio.2015.07.002
34. Bartkowiak G, Dąbrowska A, Marszałek A. Assessment of the human responses to the influence of personal liquid cooling system in the hot environment. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2014;26(2): 145-163. doi: 10.1108/IJCST-03-2013-0024
35. Nag PK, Pradhan CK, Nag A. et al. Efficacy of a water-cooled garment for auxiliary body cooling in heat. *Ergonomics*. 1998;41(2): 179-187. doi: 10.1080/001401398187233
36. McFadden Jr ER. Respiratory heat and water exchange: physiological and clinical implications. *Journal of Applied Physiology*. 1983;54(2): 331-336. doi: 10.1152/jappl.1983.54.2.331

37. Montain SJ, Cheuvront SN, Lukaski HC. Sweat mineral-element responses during 7 h of exercise-heat stress. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*. 2007;17(6): 574-582. doi: 10.1123/ijsnem.17.6.574
38. Cornbleet T, Kirch ER, Bergeim O, et al. Excretion of thiamine, riboflavin, niacin and pantothenic acid in human sweat. *Journal of the American Medical Association*. 1943;122(7): 426-429. doi: 10.1001/jama.1943.02840240016006
39. Baker LB. Physiology of sweat gland function: The roles of sweating and sweat composition in human health. *Temperature*. 2019;6(3): 211-259. doi: 10.1080/23328940.2019.1632145
40. Ekmekcioglu C, Blasche G, Dorner TE. Too much salt and how we can get rid of it. *Forschende Komplementärmedizin/Research in Complementary Medicine*. 2013;20(6): 454-460. doi: 10.1159/000357413
41. Omokhodion FO, Howard JM. Trace elements in the sweat of acclimatized persons. *Clinica Chimica Acta*. 1994;231(1): 23-28. doi: 10.1016/0009-8981(94)90250-X
42. Chinevere TD, Kenefick RW, Cheuvront SN, et al. Effect of heat acclimation on sweat minerals. *Medicine and science in sports and exercise*. 2008;40(5): 886-891. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181641c04
43. Токаев Э.С., Баженова Е.Н. Обзор Современного Рынка Функциональных Напитков. *Пиво и Напитки*. 2007;(4): 4-8.
44. Burke LM. Nutritional needs for exercise in the heat. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*. 2001;128(4): 735-748. doi: 10.1016/s1095-6433(01)00279-3
45. Shirreffs SM, Aragón Vargas LF, Keil M, et al. Rehydration after exercise in the heat: a comparison of 4 commonly used drinks. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*. 2007;17(3): 244-258. doi: 10.1123/ijsnem.17.3.244
46. Забодалова Л.А., Сучкова Е.П., Петров Д.А., и др. Разработка Комплексных Кисломолочных Напитков Для Спортивного Питания. Часть 2. *Вестник Международной Академии Холода*. 2019;(3): 59-66.
47. McEwan JA, Colwill JS. The sensory assessment of the thirst-quenching characteristics of drinks. *Food Quality and Preference*. 1996;7(2): 101-111. doi: 10.1016/0950-3293(95)00042-9
48. Benelam B, Wyness L. Hydration and health: a review. *Nutrition Bulletin*. 2010;35(1): 3-25. doi: 10.1111/j.1467-3010.2009.01795.x
49. Misra V, Shrivastava AK, Shukla SP, et al. Effect of sugar intake towards human health. *Saudi Journal of Medicine*. 2016;1(2): 29-36. doi: 10.36348/sjm.2016.v01i02.002
50. Kozisek F. Health risks from drinking demineralised water. *Nutrients in drinking water*. 2005;1(1): 148-163.

51. Zhang Y, Coca A, Casa DJ, et al. Caffeine and diuresis during rest and exercise: A meta-analysis. *Journal of science and medicine in sport*. 2015;18(5): 569-574. doi: 10.1016/j.jsams.2014.07.017

52. Inenaga K, Ono K., Hitomi S, et al. Thirst sensation and oral dryness following alcohol intake. *Japanese Dental Science Review*. 2017;53(3): 78-85. doi: 10.1016/j.jdsr.2016.12.001

References:

1. Gulev S.K., Katcov V.M., Solomina O.N. Global warming continues. *Vestnik RAN*. 2008; 78(1): 20–27. (in Russ.)

2. Houghton J. Global warming. *Reports on Progress in Physics*. 2005;68(6): 1343 doi: 10.1088/0034-4885/68/6/R02

3. Oganessian V.V. Climate change as a risk factor for the Russian economy. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*. 2019;373(3): 161–184. (in Russ.)

4. Moore TG. Global warming: The good, the bad, the ugly and the efficient. *EMBO Reports*. 2008;9(S1): S41-S45 doi: 10.1038/embo.2008.53

5. Vasil'ev D.Yu., Semenov V.A., Chibilev A.A. Climatic changes of the temperature regime on the territory of Russia in the 20th–early 21st centuries. *Geography and Natural Resources*. 2023;44(2): 15. (in Russ.) doi: 10.15372/GIPR20230202

6. Mendelsohn R, Dinar A, Williams L. The distributional impact of climate change on rich and poor countries. *Environ Dev Econ*. 2006;11(2): 159-178. doi: 10.1017/S1355770X05002755

7. Afanasyeva R.F. Heat load of the environment and its effect on the body. In: Izmerov N.F., Denisov E.I., eds. *Occupational Health Risk for Employees [Professional'nyy risk dlya zdorov'ya rabotnikov]*. Moscow: Trovant; 2003: 149–156. (in Russ.)

8. Coco A, et al. Criteria for a recommended standard: occupational exposure to heat and hot environments: DHHS (NIOSH) Publication; 2016 Feb. Publication Number 2016-106.

9. Ali MB, Hahn EJ, Paek KY. Effects of temperature on oxidative stress defense systems, lipid peroxidation and lipoxygenase activity in *Phalaenopsis*. *Plant Physiol Biochem*. 2005;43(3): 213-223. doi: 10.1016/j.plaphy.2005.01.007

10. Bartscher M, Gatterer H, Bartscher J, et al. Extreme terrestrial environments: life in thermal stress and hypoxia. A narrative review. *Front Physiol*. 2018;9: 572. doi: 10.3389/fphys.2018.00572

11. Afanasyeva R.F., Antonov A.G., Losik T.K., et al. Adequate evaluation of heating microclimate in workers' using special overalls worsening their heat state. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2005;4: 8. (in Russ.)

12. Davey S.L., Lee B.J., Robbins T., et al. Heat stress and PPE during COVID-19: impact on healthcare workers' performance, safety and well-being in NHS settings. *Journal of Hospital Infection*. 2021;108: 185–188. doi: 10.1016/j.jhin.2020.11.027
13. Renberg J, Lignier MJ, Wiggen ØN, et al. Heat tolerance during uncompensable heat stress in men and women wearing firefighter personal protective equipment. *Applied Ergonomics*. 2022;101: 103702. doi: 10.1016/j.apergo.2022.103702
14. Potter AW, Gonzalez JA, Xu X. Ebola response: modeling the risk of heat stress from personal protective clothing. *PLoS ONE*. 2015;10(11): e0143461. doi: 10.1371/journal.pone.0143461
15. Kim DH, Lee JY. Heat strain while wearing pesticide protective clothing in hot environments: effects of textile physical properties and ambient humidity. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2023;93: 103388. doi: 10.1016/j.ergon.2022.103388
16. Dolez PI, Marsha S, McQueen RH. Fibers and textiles for personal protective equipment: review of recent progress and perspectives on future developments. *Textiles*. 2022;2(2): 349–381. doi: 10.3390/textiles2020020
17. Lin YC, Yeh YT, Chen CP. Thermoregulation in response to heat stress arising from wearing chemical protective clothing when performing cleaning and disinfection. *ISEE Conf Abstract*. 2024;2024(1).
18. Afanasyeva R.F., Losik T.K., Bessonova N.A., et al. Forecasting the effect of workwear materials hygienic properties on a human's functional state in hot environment. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2015;(9): 27-27. (in Russ.)
19. Afanasyeva R.F., Prokopenko L.V., Bessonova N.A., et al. The effects of some thermal-physical properties of workwear materials on the heat state of workers in hot environment. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2015;(9): 27-28. (in Russ.)
20. Smirnov A.A. The effect of high temperature and air humidity on the rate of the human body overheating. *Hygiene and sanitation*. 1961;(10): 20-23. (in Russ.)
21. Burmistrova O.V., Losik T.K., Shuporin E.S. Physiological and hygienic substantiation of development of a technique of an estimation of overalls for protection working in the heating environment on indicators of a thermal condition. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2019;(12): 1013-1019. (in Russ.) doi: 10.31089/1026-9428-2019-59-12-1013-1019
22. Korinteli A.M., Cherunova I.V. Development and research of ventilated heat-resistant clothing. *Journal of Clothing Science*. 2020;5(1): 18. (in Russ.)
23. Zhao M, Gao C, Wang F, et al. A study on local cooling of garments with ventilation fans and openings placed at different torso sites. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2013;43(3): 232-237. doi: 10.1016/j.ergon.2013.01.001

24. Ruckman JE, Murray R, Choi HS. Engineering of clothing systems for improved thermophysiological comfort: the effect of openings. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 1999;11(1): 37-52. doi: 10.1108/09556229910258098
25. Ho C, Fan J, Newton E, et al. The effect of added fullness and ventilation holes in T shirt design on thermal comfort. *Ergonomics*. 2011;54(4): 403-410. doi: 10.1080/00140139.2011.556260
26. Pascoe DD, Shanley LA, Smith EW. Clothing and exercise: I. Biophysics of heat transfer between the individual, clothing and environment. *Sports Medicine*. 1994;18(1): 38-54. doi: 10.2165/00007256-199418010-00005
27. Lundgren K, Kuklane K, Gao C, et al. Effects of heat stress on working populations when facing climate change. *Industrial Health*. 2013;51(1): 3-15. doi: 10.2486/indhealth.2012-0089
28. Buronova S.T. Physiological features of the female body. *Economy and society*. 2022;2-1(93): 223-225. (in Russ.)
29. Iskandarov A.B. Characteristic of indicators of thermal control at workers of knitted productions. *Meditinskije novosti*. 2019;8(299): 79-80. (in Russ.)
30. Fernández Peña C, Reimúndez A, Viana F, et al. Sex differences in thermoregulation in mammals: implications for energy homeostasis. *Frontiers in Endocrinology*. 2023;14: 1093376. doi: 10.3389/fendo.2023.1093376
31. Lou L, Zhou Y, Yan Y, et al. Wearable cooling and dehumidifying system for personal protective equipment (PPE). *Energy and Buildings*. 2022;276: 112510. doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112510
32. Fadaei A. Ventilation systems and COVID-19 spread: evidence from a systematic review study. *European Journal of Sustainable Development Research*. 2021;5(2): 1-7. doi: 10.21601/ejosdr/10845
33. Lu Y, Wei F, Lai D, et al. A novel personal cooling system (PCS) incorporated with phase change materials (PCMs) and ventilation fans: an investigation on its cooling efficiency. *Journal of thermal biology*. 2015;52: 137-146. doi: 10.1016/j.jtherbio.2015.07.002
34. Bartkowiak G, Dąbrowska A, Marszałek A. Assessment of the human responses to the influence of personal liquid cooling system in the hot environment. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2014;26(2): 145-163. doi: 10.1108/IJCST-03-2013-0024
35. Nag PK, Pradhan CK, Nag A, et al. Efficacy of a water-cooled garment for auxiliary body cooling in heat. *Ergonomics*. 1998;41(2): 179-187. doi: 10.1080/001401398187233

36. McFadden Jr ER. Respiratory heat and water exchange: physiological and clinical implications. *Journal of Applied Physiology*. 1983;54(2): 331-336. doi: 10.1152/jappl.1983.54.2.331
37. Montain SJ, Cheuvront SN, Lukaski HC. Sweat mineral-element responses during 7 h of exercise-heat stress. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*. 2007;17(6): 574-582. doi: 10.1123/ijsnem.17.6.574
38. Cornbleet T, Kirch ER, Bergeim O, et al. Excretion of thiamine, riboflavin, niacin and pantothenic acid in human sweat. *Journal of the American Medical Association*. 1943;122(7): 426-429. doi: 10.1001/jama.1943.02840240016006
39. Baker LB. Physiology of sweat gland function: The roles of sweating and sweat composition in human health. *Temperature*. 2019;6(3): 211-259. doi: 10.1080/23328940.2019.1632145
40. Ekmekcioglu C, Blasche G, Dorner TE. Too much salt and how we can get rid of it. *Forschende Komplementärmedizin/Research in Complementary Medicine*. 2013;20(6): 454-460. doi: 10.1159/000357413
41. Omokhodion FO, Howard JM. Trace elements in the sweat of acclimatized persons. *Clinica Chimica Acta*. 1994;231(1): 23-28. doi: 10.1016/0009-8981(94)90250-X
42. Chinevere T.D., Kenefick R.W., Cheuvront S.N., et al. Effect of heat acclimation on sweat minerals. *Medicine and science in sports and exercise*. 2008;40(5): 886-891. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181641c04
43. Tokaev E.S., Bazhenova E.N. Review of the modern market of functional drinks. *Beer and beverages*. 2007;(4): 4-8. (in Russ.)
44. Burke LM. Nutritional needs for exercise in the heat. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*. 2001;128(4): 735-748. doi: 10.1016/s1095-6433(01)00279-3
45. Shirreffs SM, Aragón Vargas LF, Keil M, et al. Rehydration after exercise in the heat: a comparison of 4 commonly used drinks. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*. 2007;17(3): 244-258. doi: 10.1123/ijsnem.17.3.244
46. Zabodalova L.A., Suchkova E.P., Petrov D.A., et al. Development of complex acid and milk drinks for sports food. Part 2. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2019;(3): 59-66 (in Russ.) doi: 10.17586/1606-4313-2019-18-2-55-61
47. McEwan JA, Colwill JS. The sensory assessment of the thirst-quenching characteristics of drinks. *Food Quality and Preference*. 1996;7(2): 101-111. doi: 10.1016/0950-3293(95)00042-9
48. Benelam B, Wyness L. Hydration and health: a review. *Nutrition Bulletin*. 2010;35(1): 3-25. doi:10.1111/j.1467-3010.2009.01795.x

49. Misra V, Shrivastava AK, Shukla SP, et al. Effect of sugar intake towards human health. *Saudi Journal of Medicine*. 2016;1(2): 29-36. doi: 10.36348/sjm.2016.v01i02.002
50. Kozisek F. Health risks from drinking demineralised water. *Nutrients in drinking water*. 2005;1(1): 148-163.
51. Zhang Y, Coca A, Casa DJ, et al. Caffeine and diuresis during rest and exercise: A meta-analysis. *Journal of science and medicine in sport*. 2015;18(5): 569-574. doi: 10.1016/j.jsams.2014.07.017
52. Inenaga K, Ono K, Hitomi S, et al. Thirst sensation and oral dryness following alcohol intake. *Japanese Dental Science Review*. 2017;53(3): 78-85. doi: 10.1016/j.jdsr.2016.12.001

Информация об авторах:

Лосик Татьяна Константиновна – д.б.н., в.н.с. лаборатории средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова»

Конюхов Алексей Владимирович – к.м.н., врач-эпидемиолог, ст.н.с. лаборатории средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова»

Information about author:

Tatiana K. Losik – Doctor of Sciences (Biology), leading researcher Laboratories of personal protective equipment and industrial exoskeletons of the Izmerov Research Institute of Occupational Health, <https://orcid.org/0000-0001-7372-0963>

Alexey V. Konyuhov – Phd (Medicine), doctor epidemiologist, senior Researcher Laboratories of personal protective equipment and industrial exoskeletons of the Izmerov Research Institute of Occupational Health, <https://orcid.org/0000-0003-0281-6903>

Поступила/Received: 06.08.2026

Принята в печать/Accepted: 14.09.2026

УДК 314:613.62(470.57)

МЕДИКО-ДЕМОГРАФИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ И СОСТОЯНИЕ ЗДОРОВЬЯ РАБОТАЮЩЕГО НАСЕЛЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БАШКОРТОСТАН

Мулдашева Н.А.¹, Ильина Л.А.¹, Бакиров А.Б.^{1,2,3}, Каримова Л.К.¹, Валеев Т.К.¹

¹ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», Уфа, Россия

²ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет», Уфа, Россия

³Академия наук Республики Башкортостан, Уфа, Россия

Представлены итоги выполненной сотрудниками ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека» научно-исследовательской работы «Разработка стратегии создания безопасных условий труда и сохранения здоровья работников ведущих отраслей промышленности и сельского хозяйства» за 2020-2024 гг. В настоящее время отсутствуют научные исследования, характеризующиеся комплексным подходом к изучению показателей, оказывающих воздействие на состояние здоровья работающего населения в Республике Башкортостан с учетом влияния рискогенных факторов в разрезе логически выделенных временных отрезков их воздействия.

Цель исследования – разработка основных направлений региональной «Стратегии развития трудовых ресурсов, обеспечения безопасных условий труда, сохранения здоровья работающего населения Республики Башкортостан».

Материалы и методы. В ходе исследования для решения поставленных задач были использованы данные государственной статистической отчетности по России и Республике Башкортостан, материалы государственных докладов «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения». Анализ случаев смерти на рабочем месте от травм и общего заболевания был проведен на основании персонифицированных данных из материалов расследования несчастных случаев на производстве, предоставленных государственной инспекцией труда по РБ. Выполнено ретроспективное исследование сплошным методом 220 медицинских карт больных, ПЗ которым были установлены в клинике ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека» за период с 2018 по 2024 гг. Проведен детальный анализ накопленной профессиональной заболеваемости и несчастных случаев на рабочем месте, в том числе со смертельным исходом, у работников, занятых добычей руд. При выполнении данной работы осуществлены экспедиционные выезды на два предприятия,

занятых добычей и обогащением медно-цинковых руд для ознакомления с технологическими процессами основных и вспомогательных подразделений. Статистическую обработку данных проводили с использованием прикладных программ Microsoft Office 2010.

Результаты. В результате исследований установлено, что в регионе сохранялись структурные проблемы, такие как дефицит рабочей силы: число вакансий стало превышать число ищущих работу в 3 раза; падение численности молодой рабочей силы в 2020-2024 гг.: на 25-29-ти и 30-34-ти летних приходилось 21,2% и 9,4% снижения показателя соответственно; старение занятого населения – средний возраст работника в 2024 году составлял 42 года, в 2020 году – 40,3 года. Уменьшение численности постоянного населения республики за 2020-2024 гг. составило 13,2 тысяч человек, или на 0,3%, что происходило вследствие сохраняющихся более высоких показателей смертности, в первую очередь населения трудоспособного возраста, по сравнению с рождаемостью.

Были изучены условия труда и выявлены особенности структуры профессиональной заболеваемости, травматизма работников предприятий различных отраслей экономики республики. Удельный вес работников, занятых во вредных и (или) опасных условиях труда, имеет тенденцию к росту, достигнув в 2024 году 33,1%, против 32,2% в 2020 году. Показатели официальной статистики свидетельствуют о низком уровне профессиональной заболеваемости - снижение на 33,3% в 2024 году по сравнению с 2020 годом. Производственный травматизм за анализируемый период характеризовался более высокими показателями по сравнению со среднероссийскими, особенно в части несчастных случаев со смертельным исходом, и частота несчастных случаев составила от 1,01 до 1,14 на 1000 работающих. Доля смертельных случаев составила 5,7% от общего числа пострадавших.

Ограничения исследования. Переломные моменты в экономике и социальной сфере Республики Башкортостан в исследуемом периоде были связаны с рискогенными факторами (пандемия новой коронавирусной инфекции COVID-19 в 2020-2021 гг.; начало в 2022 году СВО), которые оказывали большое влияние как на анализируемые индикаторы, так и на результаты исследования.

Заключение. Получена объективная оценка состояния трудовых ресурсов, медико-демографических показателей, заболеваемости трудоспособного населения, включая профессиональную, а также несчастных случаев на производстве, в том числе со смертельным исходом в Республике Башкортостан с учётом воздействия

рискогенных факторов; выявлены ключевые проблемы по обеспечению безопасных условий труда и сохранению здоровья работающих; установлены особенности формирования профессиональной патологии у работников предприятий различных отраслей экономики; впервые проведен персонифицированный анализ несчастных случаев со смертельным исходом на рабочем месте от травм и общих заболеваний с учетом возраста, пола, профессии, стажа работы, конкретных условий труда и установлены основные производственные факторы риска их возникновения. Результаты исследований послужили основой для научного обоснования и разработки «Стратегии развития трудовых ресурсов, обеспечения безопасных условий труда, сохранения здоровья работающего населения Республики Башкортостан».

Ключевые слова: регион, медико-демографическая ситуация, показатели здоровья, работающее население, условия труда, профессиональные заболевания, травматизм, риски

Соблюдение этических стандартов: Проведение настоящего исследования не требовало одобрения этического комитета, поскольку работа не связана с использованием человека или животных в качестве объектов исследования.

Использование инструментов искусственного интеллекта: Авторы заявляют, что при подготовке настоящей рукописи системы искусственного интеллекта не применялись.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Мулдашева Н.А., Ильина Л.А., Бакиров А.Б., Каримова Л.К., Валеев Т.К. Медико-демографическая ситуация и состояние здоровья работающего населения в Республике Башкортостан. Медицина труда и экология человека. 2026; 3:47-70.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10303>

Для корреспонденции: Луиза Асхатовна Ильина, e-mail: luiza.ilina.52@mail.ru

MEDICAL AND DEMOGRAPHIC SITUATION AND HEALTH STATUS OF THE WORKING POPULATION IN THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN

Muldasheva N.A.¹, Ilyina L.A.¹, Bakirov A.B.^{1,2,3}, Karimova L.K.¹, Valeev T.K.¹

¹Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, Russia

²Bashkirian State Medical University, Ufa, Russia

³Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, Ufa, Russia

The results of the research work carried out by the staff of the Federal Budgetary Institution “Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology” on the topic “Development of a Strategy for Creating Safe Working Conditions and Preserving the Health of Workers in Leading Industries and Agriculture” for 2020–2024 are presented. Currently, there are no scientific studies that take a comprehensive approach to examining the indicators that affect the health of the working population in the Republic of Bashkortostan, taking into account the impact of risk factors across logically defined time periods of their effect.

The aim of the study is to develop the main directions of the regional “Strategy for the Development of Human Resources, Ensuring Safe Working Conditions, and Preserving the Health of the Working Population of the Republic of Bashkortostan.”

Materials and methods. In the course of the study, data from state statistical reporting for Russia and the Republic of Bashkortostan, as well as materials from state reports “On the State of the Sanitary and Epidemiological Well-being of the Population,” were used to address the set tasks. The analysis of workplace deaths due to injuries and general illnesses was carried out based on personalized data from the materials of the investigation into a work-related accident, provided by the State Labour Inspection of the Republic of Bashkortostan. A retrospective study was conducted using a continuous method, examining 220 medical records of patients whose occupational diseases were diagnosed at the clinic of the Federal Budgetary Institution “Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology” between 2018 and 2024. A detailed analysis was carried out of the accumulated occupational morbidity and workplace accidents, including fatal ones, among workers engaged in ore mining. In the course of this work, expeditionary visits were carried out to two enterprises engaged in the extraction and processing of copper-zinc ores to familiarize themselves with the technological processes of the main and auxiliary departments. Statistical data processing was carried out using Microsoft Office 2010 application software.

Results. The research has shown that the region continued to face structural problems, such as a labour shortage: the number of job vacancies exceeded the number of job seekers by a factor of three; a decline in the number of young workers between 2020 and 2024: the 25–29 and 30–34 age groups saw a 21.2% and 9.4% decrease in the workforce, respectively; and the ageing of the employed population – the average age of an employee in 2024 was 42 years, compared to 40.3 years in 2020. The decrease in the

permanent population of the republic between 2020 and 2024 amounted to 13,200 people, or 0.3%, which was due to persistently higher mortality rates, primarily among the population. The working conditions were studied and the features of the structure of occupational morbidity and injury among employees of enterprises in various sectors of the republic's economy were identified. The proportion of workers employed in harmful and/or dangerous working conditions tends to increase, reaching 33.1% in 2024, compared to 32.2% in 2020. Official statistics indicate a low level of occupational morbidity (a decrease of 33.3% in 2024 compared to 2020). Occupational injuries during the analyzed period were characterized by higher rates compared to the national average, especially in terms of fatal accidents, and the incidence rate of accidents ranged from 1.01 to 1.14 per 1,000 workers. The share of fatal cases amounted to 5.7% of the total number of victims. The research results served as the basis for the scientific substantiation and development of the Strategy for the Development of Human Resources, ensuring safe working conditions and preserving the health of the working population of the Republic of Bashkortostan.

Study limitations. The turning points in the economy and social sphere of the Republic of Bashkortostan during the study period were associated with risk-related factors (the COVID-19 pandemic in 2020–2021; the start of the special military operation in 2022), which had a significant impact both on the indicators under analysis and on the research results.

Conclusions. An objective assessment of the state of the workforce, medical and demographic indicators, morbidity of the able-bodied population, including occupational, as well as industrial accidents, including fatal ones, in the Republic of Bashkortostan, taking into account the impact of risk factors, identified key problems in ensuring safe working conditions and maintaining the health of workers; identified the features of the formation of occupational pathology in For the first time, a personalized analysis of fatal accidents in the workplace from injuries and general illnesses has been conducted, taking into account age, gender, profession, work experience and specific working conditions, and the main occupational risk factors for their occurrence have been identified. The research results served as the basis for the scientific justification and development of the “Strategy for the Development of Human Resources, Ensuring Safe Working Conditions, and Preserving the Health of the Working Population of the Republic of Bashkortostan.”

Keywords: region, medical and demographic situation, health indicators, working population, working conditions risks, occupational diseases, injuries

Compliance with ethical standards: The conduct of this study did not require approval from an ethics committee, as the work does not involve the use of humans or animals as research subjects.

Declaration of AI use. The authors declare that no artificial intelligence systems were used in the preparation of this manuscript.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Funding: the study had no financial support.

For citation: Muldasheva N.A., Ilyina L.A., Bakirov A.B., Karimova L.K., Valeev T.K. Medical and demographic situation and health status of the working population in the Republic of Bashkortostan. Occupational health and human ecology. 2026; 3:47-70.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10303>

For correspondence: Luiza A. Ilyina, e-mail: luiza.ilina.52@mail.ru

В Указе Президента Российской Федерации «О национальных целях развития РФ на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» (Указ) сохранение человеческого капитала, особенно в условиях глобальных вызовов и существующих рисков в социально-экономической и медико-демографической сферах, определено в качестве приоритетной цели государства. Согласно Указу, средняя продолжительность жизни россиян к 2030 году должна составить 78 лет, а к 2036 году – 81 год.

Для решения поставленных в Указе задач в 2025 году стартовали новые национальные проекты «Продолжительная и активная жизнь» и «Новые технологии сбережения здоровья», ключевыми приоритетами которых являются народосбережение за счет сохранения и укрепления здоровья населения, снижения смертности и роста рождаемости, ликвидации проблемы трудонедостаточности, как одной из главных стратегических угроз экономике страны и ее регионов.

В последние годы вопросом сохранения здоровья населения, повышения продолжительности активной трудовой жизни, снижения смертности и заболеваемости трудоспособного населения, утраты здоровья работниками, в первую очередь вследствие профзаболеваний, производственных травм и потери рабочего времени по этим причинам уделяется большое внимание представителями научного сообщества [1-6].

Современная демографическая ситуация в Российской Федерации и большинстве ее регионов характеризовалась депопуляционными процессами, частично нивелируемыми внешней миграцией, трансформацией возрастно-половой пирамиды в сторону старения населения, в том числе трудоспособного. Состояние здоровья российской популяции определялось высокой долей хронических неинфекционных заболеваний (ХНИЗ): в 2024 году 45,3% россиян имели ХНИЗ, требующие диспансерного наблюдения или специализированной медицинской помощи (за 2020 год данные искажены под влиянием пандемии). В структуре смертности населения России продолжали доминировать болезни системы кровообращения (около 45%), новообразования (16%) и внешние причины смерти.

На состояние здоровья и сохранение жизни работающего населения РФ в первую очередь оказывали влияние вредные условия труда и несоблюдение требований охраны труда, которые приводили к опасным нарушениям здоровья, смерти. По данным Росстата, по итогам 2024 года в России насчитывалось более 4,8 млн человек, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, или 34,9% от общей численности работников в тех видах экономической деятельности (в 2020 году около 32,6% от общей численности работников), по которым ведётся такая статистика (без субъектов малого предпринимательства).

В работах ряда ведущих ученых отражены региональная специфика демографического развития, использования трудовых ресурсов. В подавляющем большинстве регионов отмечались естественная убыль и демографическое старение населения, формирование трудонедостаточности и отрицательная деформация возрастной структуры рабочей силы [7-10].

Республика Башкортостан является одной из крупнейших по численности населения и объему валового регионального продукта субъектов Российской Федерации с преобладанием в структуре хозяйственной деятельности промышленности (до 42% валового регионального продукта), развитыми добывающей, химической, машиностроительной отраслями. Современные проблемы сохранения и укрепления здоровья работающего населения, повышения продолжительности активной трудовой жизни, снижения смертности и заболеваемости трудоспособного населения Республики Башкортостан отражены в научных трудах [11-14]. В доступной литературе отсутствуют научные исследования, характеризующиеся комплексным подходом к изучению показателей, оказывающих воздействие на состояние здоровья работающего населения в Республике Башкортостан с учетом влияния рискогенных факторов в разрезе логически выделенных временных отрезков их воздействия.

Все вышеизложенное определило актуальность проведения исследований с применением комплексного подхода для выявления трендов социально-экономических, медико-демографических показателей трудоспособного населения Республики Башкортостан в условиях влияния ряда рискогенных факторов (пандемия, геополитические вызовы), а также анализа условий труда, профессиональной заболеваемости, несчастных случаев на рабочем месте, в том числе со смертельным исходом, на предприятиях различных отраслей экономики.

Материалы и методы. В ходе исследования для решения поставленных задач были использованы данные государственной статистической отчетности по России и Республике Башкортостан, материалы государственных докладов «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения». Анализ случаев смерти на рабочем месте от травм и общего заболевания был проведён на основании персонифицированных данных из материалов расследования несчастных случаев на производстве, предоставленных государственной инспекцией труда по РБ. Данные по результатам анализа были обобщены по видам экономической деятельности, полу, возрасту, дате и времени несчастного случая, классу условий труда, режимам труда и отдыха, медицинским осмотрам, причинам смерти. Выполнено ретроспективное исследование сплошным методом 220 медицинских карт больных, ПЗ которым были установлены в клинике ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека» за период с 2018 по 2024 гг. Проведен детальный анализ накопленной профессиональной заболеваемости и несчастных случаев на рабочем месте, в том числе со смертельным исходом, у работников, занятых добычей руд. При выполнении данной работы осуществлены экспедиционные выезды на два предприятия, занятых добычей и обогащением медно-цинковых руд для ознакомления с технологическими процессами основных и вспомогательных подразделений. Статистическую обработку данных проводили с использованием прикладных программ Microsoft Office 2010.

Результаты. В рамках отраслевой научно-исследовательской программы Роспотребнадзора на 2021-2025 годы «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России» сотрудниками ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека» была выполнена НИР «Разработка стратегии создания безопасных условий труда и сохранения здоровья работников ведущих отраслей промышленности и сельского хозяйства», которая была направлена на решение следующих задач:

1. Изучение региональных тенденций естественного движения населения и трудовых ресурсов, медико-демографических показателей и заболеваемости трудоспособного населения, в том числе в разрезе отдельных промышленных территорий республики.
2. Анализ показателей состояния социальной и трудовой сферы республики, оказывающих существенное влияние на уровень и качество жизни трудоспособного населения.
3. Изучение динамики показателей условий труда, профессиональной заболеваемости, травматизма в разрезе видов экономической деятельности, а также инвалидности трудоспособного населения вследствие травм и профзаболеваний по данным официальной статистики.
4. Изучение производственных факторов риска, основных форм профессиональной патологии работников предприятий различных отраслей экономики по материалам расследования профессиональных заболеваний.
5. Анализ смертельных случаев на рабочем месте в результате травм и общих заболеваний на основании материалов расследования несчастных случаев на производстве с использованием персонифицированных данных.
6. Разработка научно обоснованных направлений «Стратегии развития трудовых ресурсов, обеспечения безопасных условий труда, сохранения здоровья работающего населения Республики Башкортостан».

Анализ социально-экономического положения, медико-демографической ситуации, состояния трудовых ресурсов и заболеваемости трудоспособного населения Республики Башкортостан за 2020-2024 гг. выявил многовекторные тенденции изменения показателей, вызванные как комплексным влиянием рискованных факторов (пандемия, западные санкции, специальная военная операция), так и спецификой развития социально-экономических и демографических процессов в регионе в отдельные периоды времени.

Переломные моменты в экономике и социальной сфере республики были связаны с пандемией новой коронавирусной инфекции COVID-19 в 2020-2021 гг. и началом в 2022 году СВО: индекс промышленного производства имел минимальные значения в 2021 г. и составлял 99,1% к уровню 2020 года, а в 2024 году он снизился еще на 3,1 % по сравнению с предыдущим годом.

За исследуемый период естественное движение населения Республики Башкортостан, в том числе трудоспособного, также находилось под воздействием рискованных факторов в различные периоды их возникновения и ослабления и характеризовалось устойчивой тенденцией к сокращению демографического потенциала, низкими показателями рождаемости и относительно высокими показателями смертности. На начало 2020 года

численность постоянного населения составляла 4037811 человек, к началу 2024 года - 4019698 человек. Абсолютное сокращение за четырехлетний интервал составляло 18453 человека, что эквивалентно относительному снижению на 0,46% от базовой величины 2020 года.

Пиковые значения естественной убыли населения в РБ приходились на годы пандемии COVID-19: в 2020 году – на 19,2 тысяч человек, в 2021 году – на 26,7 тысяч человек, т.е. суммарная убыль достигла за два года пандемии 45,9 тысяч человек. Начиная со второй половины 2022 года темпы сокращения замедлились, однако вектор движения остался отрицательным.

За весь анализируемый период (2020-2024 гг.) коэффициент рождаемости в Башкортостане снизился почти на 20,0 %.

Сокращение численности сопровождалось углублением процесса демографического старения. Удельный вес лиц старше трудоспособного возраста увеличился с 24,1% в 2020 году до 25,4% в 2024 году. Одновременно доля детей и подростков (0–15 лет) стагнирует на уровне 19,2–19,4%.

Происходило смещение индекса демографической нагрузки: если в 2020 году на 1000 человек трудоспособного возраста приходилось 782 нетрудоспособных, то к 2024 году этот показатель приблизился к 815.

Серьезным вызовом, ограничивающим экономический рост в регионе в анализируемом периоде, был нарастающий дефицит рабочей силы, численность которой в период пандемии сократилась на 28,2 тысяч человек, и в 2024 году она составляла 1933,3 тысяч человек (в 2023 г. – 1947,7 тысяч человек).

Одной из выявленных особенностей исследуемого периода являлось снижение в республике численности рабочей силы в молодых возрастных группах и рост её численности в средних и старших возрастных когортах. Установлено, что в 2020-2024 гг. наибольшее снижение численности рабочей силы приходилось на 25-29-ти и 30-34-ти летних: 21,2% и 9,4% соответственно, что свидетельствует о демографическом старении трудоспособного населения Башкортостана.

Важнейший демографический показатель – ожидаемая продолжительность жизни (ОПЖ) за период 2020-2021 гг. в условиях пандемии новой коронавирусной инфекции COVID-19 потерял 3,15 года. По итогам 2024 года ожидаемая продолжительность жизни в регионе выросла по сравнению с 2020 годом на 1,64 года и составила 72,0 года.

Исследования подтвердили, что демографические процессы оказывали непосредственное влияние на экономическое развитие Республики Башкортостан. В свою очередь, социально-экономические факторы определяли динамику демографических процессов и показателей состояния здоровья населения региона, в том числе трудоспособного возраста.

Численность населения трудоспособного возраста Республики Башкортостан составляла в 2024 году 2332,4 тысяч человек, снизившись за 2020-2024 гг. на 80,7 тысяч человек, в первую очередь вследствие устойчивой тенденции роста смертности трудоспособного населения.

Самые высокие показатели смертности трудоспособного населения РБ как среди женщин, так и среди мужчин, приходились на период пандемии новой коронавирусной инфекции COVID-19 в 2020-2021 годах (611,3‰ и 642,2‰ соответственно). В последующие 2 года наблюдалось снижение смертности трудоспособного населения, которая вновь выросла до 673,1‰ в 2024 году (мужчины – 1084,2‰; женщины – 262,3‰).

В целом в анализируемом периоде основными причинами смерти трудоспособного населения республики являлись болезни системы кровообращения (БСК) и новообразования, а в период пандемии новой коронавирусной инфекции COVID-19 значительно выросла доля болезней органов дыхания, смертность населения от которых составляла 173,0 и 217,4 на 100 тысяч человек соответственно.

Наблюдался рост смертности взрослого населения по неустановленным причинам в 4,1 раза в 2023 году и в 4,7 раза в 2024 году по сравнению с предыдущими годами.

Изучение общей заболеваемости взрослого населения в 2020-2024 гг. позволило установить, что в ее структуре на первых трех ранговых местах по средним многолетним показателям находились БСК – 20,9 %; заболевания органов дыхания – 16,3 %; заболевания костно-мышечной системы и соединительной ткани – 9,5 %.

Одной из основных задач данного исследования было проведение анализа условий труда, профессиональной заболеваемости, травматизма на предприятиях и в организациях республики.

Основными факторами, обуславливающими возникновение профессиональных заболеваний, производственного травматизма являются вредные условия труда и несоблюдение требований охраны труда.

Вредные условия труда работников различных отраслей экономики формировались, преимущественно, за счет несоответствия гигиеническим нормативам по уровням шума, параметрам микроклимата, вибрации, неионизирующего излучения, АПФД, химического и биологического факторов, а также тяжести трудового процесса.

Установлено, что удельный вес работников, занятых во вредных и (или) опасных условиях труда, имеет тенденцию к росту, достигнув 2024 году 33,1% против 32,2% в 2018 году. Наиболее неблагоприятная ситуация складывалась на предприятиях по добыче полезных ископаемых (47,7%), обрабатывающих производствах (41,6%), металлургии (66,2%), производстве химических веществ (60,8%) и строительстве (39,8%).

При этом отмечается и увеличение численности работников, подвергавшихся воздействию конкретных вредных факторов: шума – на 16,0%, вибрации – на 15,0%, ионизирующего излучения – на 22,0%, тяжести и напряжённости труда – на 8,0–10,0%.

Реальная гигиеническая ситуация на предприятиях и в организациях Республики может быть еще более неблагоприятной в связи с недоучетом ряда производственных факторов, не предусмотренных методикой проведения специальной оценки условий труда (СОУТ), нарушением объемов и периодичности лабораторных исследований отдельных факторов рабочей среды и трудового процесса в рамках проведения производственного контроля.

Вредные условия труда и несоблюдение требований охраны труда создают условия для развития у работников профессиональной патологии, однако показатель официальной статистики свидетельствует о ее низком уровне (снижение на 33,3 % в 2024 году по сравнению с 2018 годом). Исключение составил 2021 год, когда максимальные значения показателя ПЗ были зарегистрированы во время пандемии Covid-19 – 0,07 на 1000 работников.

Анализ статистических показателей профессиональной заболеваемости за период наблюдения показал, что они были зарегистрированы только на предприятиях 6 видов экономической деятельности. Наиболее высокие показатели отмечались на предприятиях по добыче полезных ископаемых, обрабатывающих производств.

Исключение составил 2021 год, когда из-за пандемии Covid-19 отмечался значительный рост показателей профессиональной заболеваемости в учреждениях здравоохранения, превышая значения аналогичного показателя за 2018 год в 38 раз.

Структура ПЗ в рассматриваемый период была различной. В 2018 и 2019 гг. преобладали заболевания, обусловленные воздействием физических перегрузок и физических факторов. В 2020 и 2021 гг. наблюдалось явное преобладание патологии, вызванной биологическим фактором. В последующие периоды (2023, 2024 гг.) структура вновь сместилась в сторону преобладания заболеваний от воздействия физических факторов и перенапряжения отдельных органов и систем.

Аналогичные структурные сдвиги в профессиональной заболеваемости в пандемийные годы произошли как в других регионах, так и в целом по России.

На предприятиях строительной отрасли, в которой каждый третий работник трудился во вредных условиях (32,9–36,1 % в 2018–2024 гг.), сохраняются низкие уровни профессиональной заболеваемости от 0,06 % до полного отсутствия случаев.

Наблюдаемые значительные несоответствия уровня профессиональной заболеваемости и доли работников, занятых во вредных условиях труда, по нашему мнению, отражают специфические особенности строительной отрасли: наличие большого количества сезонных рабочих, недостаточно объективная оценка условий труда при проведении СОУТ, формальное проведение предварительных и периодических медицинских осмотров работников.

Отмечено преобладание хронических случаев профессиональных заболеваний над острыми (76,3% против 23,7% соответственно). Хроническая патология в основном формировалась у работников со стажем работы во вредных условиях 26–30 лет. Этот факт свидетельствует о необходимости своевременного выявления начальных стадий ПЗ в процессе проведения периодических медицинских осмотров.

Ретроспективный углубленный анализ 220 случаев профессиональных заболеваний (ПЗ), установленных в клинике ФБУН «УфНИИ медицины труда и экологии человека» в 2018–2024 гг., показал, что 89 % пациентов работали во вредных условиях труда, 1,2 % – в опасных, и 9,8 % – в допустимых.

При этом тяжесть труда обусловила 37,8% случаев профессиональных заболеваний, влияние физических факторов (вибрация, шум) стало причиной 27,6% ПЗ. На долю биологических факторов пришлось 25,5% ПЗ, химических – 3,3%.

Наибольшее количество профессиональных заболеваний зафиксировано у работников обрабатывающих производств (38,6%), на втором месте – работники предприятий по добыче полезных ископаемых (14,1%), на третьем – сельского и лесного хозяйства (8,2%). Хроническая профессиональная патология формировалась при стаже работы во вредных условиях от 31 до 35 лет.

Наиболее часто у рассматриваемого контингента профессиональных больных отмечались болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани (37,8%), на втором месте находились травмы, отравления и некоторые другие последствия воздействия внешних причин (15,3%), третье ранговое место занимали инфекционные и паразитарные болезни (25,5%), далее следовали болезни уха и сосцевидного отростка (12,4%). Одной из распространенных нозологических форм в структуре профессиональных заболеваний явилась радикулопатия пояснично-крестцового отдела позвоночника вследствие физических перегрузок и функционального перенапряжения отдельных органов и систем. Повышенному риску ее развития подвержены водители передвижных и транспортных средств - 51,1%, волочильщики проволоки - 25,5%, проходчики - 6,4%.

Профессиональные заболевания медицинским работникам устанавливались преимущественно в виде аллергических заболеваний (бронхиальная астма) и инфекционных заболеваний в хронической форме, этиологическим фактором которых послужили микобактерии туберкулеза, а 2020–2022 гг. в основном возбудитель новой коронавирусной инфекции Covid-19 в острой форме.

Производственный травматизм в Республике Башкортостан характеризовался более высокими показателями по сравнению со среднероссийскими, особенно в части несчастных случаев со смертельным исходом.

Частота несчастных случаев с потерей трудоспособности увеличилась с 1,01 до 1,14 на 1000 работающих. Доля смертельных случаев, по данным Башкортостанстата, составляла 5,7% от общего числа пострадавших.

Наиболее травмоопасными видами экономической деятельности являлись строительство, добыча полезных ископаемых, обрабатывающие производства, транспортировка и хранение. Основными видами травм были дорожно-

транспортные происшествия, падения с высоты и воздействие движущихся частей оборудования.

Поскольку травматизм, в том числе, со смертельным исходом, является важным показателем, характеризующим профессиональный риск, было выполнено детальное изучение несчастных случаев на рабочем месте со смертельным исходом как связанных, так и не связанных с производством на основе анализа персонифицированных данных с подробным изучением конкретных обстоятельств и причин.

Установлено, что несчастные случаи со смертельным исходом как связанные, так и не связанные с производством чаще происходили в таких отраслях экономики, как обрабатывающие производства, транспортировка и хранение, добыча полезных ископаемых, строительство. От общих заболеваний чаще погибали мужчины старше 40 лет, при травмах – в возрасте 39–40 лет.

Основной причиной смерти на рабочем месте являлись болезни системы кровообращения (95,3% случаев), прежде всего острая ишемическая болезнь сердца (58,1% случаев).

Группу риска смерти на рабочем месте от общего заболевания составили водители, машинисты передвижных транспортных средств, слесари, охранники, преимущественно мужского пола в возрасте от 40 до 60 лет.

В ряде случаев имелись грубые нарушения режима труда и отдыха (сверхурочные более 200 часов в год, отсутствие выходных), не проводились медосмотры, допуск к работам осуществлялся с нарушениями. В 2023 году два случая внезапной смерти на рабочем месте от общих заболеваний были переквалифицированы в связанные с производством именно по этим основаниям, что свидетельствует о необходимости расширения критериев экспертизы и усиления контроля за соблюдением трудового законодательства.

Выявлены группы работников повышенного риска смерти на рабочем месте от травм, в которые вошли водители, машинисты транспортных средств, строители, слесари. Чаще погибали лица мужского пола, имевшие стаж работы до одного года в возрасте 30–39 лет. Основными причинами гибели являлись неудовлетворительная организация работ, нарушение правил дорожного движения.

Установлено, что наиболее высокий риск нарушения здоровья работников по показателям условий труда, профессиональной заболеваемости, производственному травматизму отмечался на предприятиях по добыче полезных ископаемых. Персонифицированный анализ профессиональной заболеваемости и производственного травматизма в данной отрасли показал, что наибольшие показатели отмечались на предприятиях по добыче металлических руд.

В горнорудном комплексе Республики Башкортостан, представленном предприятиями по добыче и обогащению медно-цинковых руд, 60,9% работников заняты во вредных условиях труда, показатель профессиональной заболеваемости в 6 раз выше среднего республиканского уровня. Указанное вызвало необходимость разработки адресных профилактических программ. В рамках исследования были разработаны и предложены для внедрения на этих предприятиях актуализированная программа производственного контроля за условиями труда и комплексная программа по минимизации профессиональных рисков для предприятий по добыче полиметаллических руд.

Ожидается, что результатом внедрения данных программ станет сокращение уровня профессиональной заболеваемости, производственного травматизма и количества впервые установленных случаев инвалидности, а также увеличение охвата профилактическими медицинскими осмотрами.

Обсуждение. На результаты исследования большое влияние оказало объявление 11 марта 2020 года ВОЗ о начале пандемии новой коронавирусной инфекции COVID-19 – мощного эпидемиологического риск-фактора, который привел к разрушительным последствиям во всех сферах жизни населения, бизнеса, функционировании социальных отраслей, в первую очередь системы здравоохранения.

В силу этого период 2020-2021 гг. в Башкортостане, как в стране и мире, характеризовался общим экономическим спадом, кризисом занятости, падением доходов, ограниченным доступом к основным социально-значимым услугам, в том числе медицинскому обслуживанию. Основной вклад в потери населения республики вносила избыточная смертность от коронавирусной инфекции в условиях пандемии. Сложная эпидемиологическая ситуация и введение ограничительных мероприятий особого порядка осуществления работы предприятий и организаций обусловили резкое снижение выявления профессиональной патологии у работников.

В 2020 году эпидемия коронавирусной инфекции привела к изменению структуры профессиональной заболеваемости в связи с фактом заражения медицинских работников при исполнении ими должностных обязанностей возбудителем новой коронавирусной инфекции SARS-CoV-2. Показатель профзаболеваемости в отрасли, связанной с деятельностью в области здравоохранения и социальных услуг, вырос, по отношению к 2019 г., в шесть раз и составил в 2020г. – 0,22 на 1000 работников.

Данной проблеме уделяли внимание ученые различных стран, поскольку медицинские работники составляли третью часть от общего числа инфицированных новой коронавирусной инфекцией COVID-19.

Выводы. В целом по итогам комплексных исследований в рамках НИР:

- получена объективная оценка состояния трудовых ресурсов, медико-демографических показателей, заболеваемости трудоспособного населения, включая профессиональную, а также несчастных случаев на производстве, в том числе со смертельным исходом в Республике Башкортостан, выявлены ключевые проблемы по обеспечению безопасных условий труда и сохранению здоровья работающих;
- установлены региональные, внутритерриториальные особенности динамики демографических процессов, показателей заболеваемости и смертности среди взрослого трудоспособного населения с учётом воздействия рискогенных факторов;
- установлены особенности формирования профессиональной патологии у работников предприятий различных отраслей экономики;
- впервые проведен персонифицированный анализ несчастных случаев со смертельным исходом на рабочем месте от травм и общих заболеваний с учетом возраста, пола, профессии, стажа работы и конкретных условий труда;
- выполнена оценка экономического ущерба от травм и общих заболеваний со смертельным исходом на рабочем месте;
- установлены основные производственные факторы риска и причины несчастных случаев со смертельным исходом на рабочем месте от травм и общих заболеваний, выявлены группы повышенного риска их возникновения.

Результаты исследований послужили основой для научного обоснования и разработки «Стратегии развития трудовых ресурсов, обеспечения безопасных условий труда, сохранения здоровья работающего населения Республики Башкортостан», основными направлениями и приоритетами которой были определены:

- увеличение продолжительности жизни, активного трудового долголетия, снижение смертности и сохранение здоровья населения региона, в том числе работающего;
- реализация гигиенически обоснованных мероприятий, направленных на улучшение среды обитания и снижение ее негативного воздействия на здоровье населения;
- обеспечение доступности и качества гарантированной медицинской помощи населению территорий по обращаемости, в рамках диспансеризации и профилактических осмотров, в том числе работников, занятых во вредных условиях труда;
- проведение учреждениями здравоохранения лечебно-профилактических мероприятий на основании выявленных факторов риска нарушения здоровья трудоспособного населения, в том числе с целью раннего выявления профессиональных заболеваний и своевременного предупреждения инвалидизации на основе адресных профилактических мероприятий для работников с высоким риском нарушения здоровья;
- формирование у населения республики приверженности к здоровому образу жизни за счет внедрения здоровье- и жизнесберегающего поведения в быту и в сфере трудовой деятельности;
- продолжение реализации программ «Здоровый муниципалитет», корпоративных программ и обеспечение их скоординированности в рамках полномочий органов местного самоуправления и социальной ответственности бизнеса на территории его присутствия;
- усиление взаимодействия всех заинтересованных сторон по вопросам сохранения здоровья работников и стимулирования работодателей к обоснованной оптимизации затрат на проведение профилактических медицинских осмотров, оздоровительных мероприятий, максимального использования ресурсов медико-санитарных частей и профилакториев, находящихся в их ведении.

Полученные в ходе исследований результаты нашли отражение более чем в 100 публикациях в отечественных и зарубежных научных журналах, докладывались на

всероссийских и международных конференциях, использовались при составлении и корректировке санитарных правил и нормативов (3), методических документов, учебных пособий и методических рекомендаций (6). По итогам выполненной научно-исследовательской работы получены патенты на изобретение и промышленные образцы (3), а также свидетельство о регистрации компьютерной программы (1).

Результаты исследований позволили научно обосновать и разработать Корпоративные программы сохранения здоровья работников предприятий и организаций Республики Башкортостан (внедрены на 2-х предприятиях).

Решением Межведомственной комиссии по охране труда Республики Башкортостан при Правительстве Республики Башкортостан программа «Профилактика внезапной смерти от общих заболеваний на рабочем месте» рекомендована для внедрения на всех предприятиях Республики Башкортостан (протокол № 67 от 30.04.2021).

Практическая значимость результатов исследований подтверждается их внедрением в деятельность органов государственной власти Республики Башкортостан, а полученные материалы и разработки используются при реализации программных документов по демографической политике в регионе, корректировке дорожных карт по снижению смертности, а также формировании перечня первоочередных мероприятий по улучшению условий труда работающих.

Вклад авторов:

Концепция и дизайн исследования – Мулдашева Н.А., Ильина Л.А., Бакиров А.Б., Каримова Л.К., Валеев Т.К.

Сбор и обработка материала – Мулдашева Н.А., Ильина Л.А., Бакиров А.Б., Каримова Л.К., Валеев Т.К.

Анализ данных – Мулдашева Н.А., Ильина Л.А., Бакиров А.Б., Каримова Л.К., Валеев Т.К.

Написание текста и оформление статьи – Мулдашева Н.А., Ильина Л.А., Бакиров А.Б., Каримова Л.К.

Редактирование – Мулдашева Н.А., Ильина Л.А.

Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех ее частей.

Author contribution:

Concept and design of the study – Muldasheva N.A., Ilyina L.A., Bakirov A.B., Karimova L.K., Valeev T.K.

Collection and processing of material – Muldasheva N.A., Ilyina L.A., Bakirov A.B., Karimova L.K., Valeev T.K.

Data analysis – Muldasheva N.A., Ilyina L.A., Bakirov A.B., Karimova L.K., Valeev T.K.

Writing the text and designing the article – Muldasheva N.A., Ilyina L.A., Bakirov A.B., Karimova L.K.

Editing – Muldasheva N.A., Ilyina L.A.

All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Список литературы:

1. Зайцева Н.В., Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Клейн С.В., Кирьянов Д.А., Глухих М.В. Социально-экономические детерминанты и потенциал роста ожидаемой продолжительности жизни населения Российской Федерации с учетом региональной дифференциации // Анализ риска здоровью. – 2019. – № 4. – С. 14–29. DOI: 10.21668/health.risk/2019.4.02
2. Баскакова М.Е. Потенциальная рабочая сила современной России: социально-демографический портрет и уровень образования // Социально-трудовые исследования. – 2022. - №48(3). – С. 105–117. DOI: 10.34022/2658–3712-2022-48-3-105-117.
3. Демография 2030. Как обеспечить устойчивый рост населения Российской Федерации. Специальный доклад Общественной палаты Российской Федерации / С.И. Рыбальченко, А.В. Коротаев, И.А. Ефремов и др.; отв. ред. С.И. Рыбальченко; ОПРФ. – М.: ООО «Пачоли Консалтинг», 2023. - 86 с.
4. Иванова А. Е. Подходы к оценке резервов снижения смертности в России // Уровень жизни населения регионов России. - 2022. - Т. 18. - №2. С. 177–188.
5. Семенова В.Г., Сабгайда Т.П., Зубко А.В., Евдокушкина Г.Н. Потери населения России трудоспособного возраста в стабильные и кризисные периоды в контексте основных факторов риска // Социальные и гуманитарные знания. - 2023. - Т. 9. - № 1. - С. 84–101.
6. Вадулина, Н. В., Галлямов М.А., Девятова С. М. Профессиональная заболеваемость в России: проблемы и решения // Безопасность техногенных и природных систем. – 2020. – № 3. – С. 7-15. Doi: 10.23947/2541–9129-2020-3-7-15.
7. Народосбережение в регионе: диагностика состояния и изменения социально-экономического развития: монография / под ред. А. А. Тарасьева; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2024. – 148 с.
8. Леденева М.В., Шамрай-Курбатова Л.В., Столярова А.Н., Чумакова Е.А. Кластерный анализ регионов России по демографическим показателям //

Креативная экономика. – 2022. – Том 16. – №4. – С. 1621–1636. doi: 10.18334/ce.16.4.114526

9. Ильина Л. А., Валеев Т.К., Каримова Л.К. Стратегирование развития трудовых ресурсов как элемент регионального управления // Экономика и управление: научно-практический журнал. 2026. № 3. С. 22–25.

10. Бобкова Е.В., Ефимова Н.В. Выявление зон риска по коэффициенту общей смертности населения и факторам образа жизни на уровне региона // Уральский медицинский журнал. – 2023. - №22(4). – С. 36–43. <http://doi.org/10.52420/2071-5943-2023-22-4-36-43>

11. Шайхлисламова Э.Р., Бакиров А.Б., Каримова Л.К., Ильина Л.А., Мулдашева Н.А., Шаповал И.В. Здоровье работающего населения Республики Башкортостан: состояние и пути его сохранения // Медицина труда и экология человека. – 2024. - №2. – С. 84–91.

12. Ильина Л. А., Бакиров А. Б., Каримова Л. К., Мулдашева Н. А., Шаповал И. В., Бейгул Н.А. Взаимосвязь и динамика основных социально-экономических показателей жизни и медико-демографических характеристик населения Республики Башкортостан // Медицина труда и экология человека. – 2024. - №2. – С. 46-66.

13. Хакимова А.М., Шарафутдинова Н.Х., Мухамадеева О.Р., Еникеева Д.Р., Халфин Р.М., Павлова М.Ю., Латыпов А.Б., Киньябулатов А.У., Аверьянова К.С. Общие и специальные показатели смертности населения в Республике Башкортостан в период с 2018 по 2020 гг. // Социальные аспекты здоровья населения [сетевое издание]. – 2022. - №68(3). – С. 9. Режим доступа: <http://vestnik.mednet.ru/content/view/1379/30/lang,ru/> DOI: 10.21045/2071-5021-2022-68-3-9

14. Лакман И.А., Аскарлов Р.А., Тимирьянова В.М., Аскарова З.Ф. Пространственное моделирование смертности трудоспособного населения Республики Башкортостан // Здоровье населения и среда обитания. 2023. Т. 31. № 12. С. 7–16. doi: 10.35627/2219-5238/2023-31-12-7-16

References:

1. Zaitseva N.V., Onishchenko G.G., Popova A.Yu., Klein S.V., Kiryanov D.A., Glukhikh M.V. Socio-economic determinants and potential for increasing life expectancy of the population of the Russian Federation taking into account regional differentiation. *Analiz riska zdorov'yu*. 2019;(4):14–29. DOI: 10.21668/health.risk/2019.4.02 (in Russian).

2. Baskakova M.E. Potential labor force of modern Russia: socio-demographic portrait and level of education. *Sotsial'no-trudovye issledovaniya*. 2022;(48(3)):105–117. DOI: 10.34022/2658-3712-2022-48-3-105-117 (in Russian).

3. Rybalchenko S.I., Korotaev A.V., Efremov I.A., et al. *Demography 2030: How to ensure sustainable population growth in the Russian Federation. Special report of the Public Chamber of the Russian Federation*. Ed. by S.I. Rybalchenko. Moscow: ООО «Pacholi Konsalting»; 2023. 86 p. (in Russian).

4. Ivanova A.E. Approaches to assessing reserves for reducing mortality in Russia. *Uroven' zhizni naseleniya regionov Rossii*. 2022;18(2):177–188. (in Russian).
5. Semenova V.G., Sabgayda T.P., Zubko A.V., Evdokushkina G.N. Losses of the working-age population of Russia in stable and crisis periods in the context of major risk factors. *Sotsial'nye i gumanitarnye znaniya*. 2023;9(1):84–101. (in Russian).
6. Vadulina N.V., Gallyamov M.A., Devyatova S.M. Occupational morbidity in Russia: problems and solutions. *Bezopasnost' tekhnogennykh i prirodnykh sistem*. 2020;(3):7–15. DOI: 10.23947/2541–9129-2020-3-7-15 (in Russian).
7. Tarasyev A.A., ed. *Population preservation in the region: diagnostics of the state and changes in socio-economic development: monograph*. Yekaterinburg: Ural University Press; 2024. 148 p. (in Russian).
8. Ledeneva M.V., Shamray-Kurbatova L.V., Stolyarova A.N., Chumakova E.A. Cluster analysis of Russian regions by demographic indicators. *Kreativnaya ekonomika*. 2022;16(4):1621–1636. DOI: 10.18334/ce.16.4.114526 (in Russian).
9. Ilyina L.A., Valeev T.K., Karimova L.K. Strategizing the development of labor resources as an element of regional management. *Ekonomika i upravlenie*. 2026;(3):22–25. (in Russian).
10. Bobkova E.V., Efimova N.V. Identification of risk zones by total mortality rate and lifestyle factors at the regional level. *Ural'skiy meditsinskiy zhurnal*. 2023;(22(4)):36–43. DOI: 10.52420/2071-5943-2023-22-4-36-43 (in Russian).
11. Shaykhislamova E.R., Bakirov A.B., Karimova L.K., Ilyina L.A., Muldasheva N.A., Shapoval I.V. Health of the working population of the Republic of Bashkortostan: state and ways of its preservation. *Meditsina truda i ekologiya cheloveka*. 2024;(2):84–91. (in Russian).
12. Ilyina L.A., Bakirov A.B., Karimova L.K., Muldasheva N.A., Shapoval I.V., Beygul N.A. Interrelation and dynamics of the main socio-economic indicators of life and medico-demographic characteristics of the population of the Republic of Bashkortostan. *Meditsina truda i ekologiya cheloveka*. 2024;(2):46–66. (in Russian).
13. Khakimova A.M., Sharafutdinova N.Kh., Mukhamadeeva O.R., Enikeeva D.R., Khalfin R.M., Pavlova M.Yu., Latypov A.B., Kin'yabulatov A.U., Averyanova K.S. General and specific mortality rates of the population in the Republic of Bashkortostan from 2018 to 2020. *Sotsial'nye aspekty zdorov'ya naseleniya* [online]. 2022;(68(3)):9. DOI: 10.21045/2071–5021-2022-68-3-9 (in Russian).
14. Lakman I.A., Askarov R.A., Timiryanova V.M., Askarova Z.F. Spatial modeling of mortality of the working-age population of the Republic of Bashkortostan. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*. 2023;31(12):7–16. DOI: 10.35627/2219–5238/2023-31-12-7-16 (in Russian).

Информация об авторах

Мулдашева Надежда Алексеевна - научный сотрудник отдела комплексных проблем гигиены и экологии человека ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и

экологии человека» (e-mail: muldasheva51@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3518-3519>)

Ильина Луиза Асхатовна - кандидат экономических наук, старший научный сотрудник отдела комплексных проблем гигиены и экологии человека, ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», Уфа, Россия (e-mail: list@ufanet.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6481-0534>)

Бакиров Ахат Бариевич - доктор медицинских наук, профессор, академик Академии наук Республики Башкортостан, советник директора ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека»; заведующий кафедрой терапии и профессиональных болезней с курсом ИДПО ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Уфа, Россия (e-mail: akhatb@bk.ru; тел.: 8 (347) 255-19-57; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3510-2595>).

Каримова Лилия Казымовна - доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник отдела комплексных проблем гигиены и экологии человека ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека» (e-mail: iao_karimova@rambler.ru; тел. 8 (347) 255-57-21; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4995-0854>)

Валеев Тимур Камилевич - кандидат биологических наук, заведующий отделом комплексных проблем гигиены и экологии человека, ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», Уфа, Россия (e-mail: valeevtk2011@mail.ru; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7801-2675>).

Author information

Nadezhda A. Muldasheva – Researcher at the Department of Complex Problems of Hygiene and Human Ecology of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology (e-mail: muldasheva51@gmail.com; tel: +7 (347) 255-57-21; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3518-3519>)

Luisa A. Ilyina – Candidate of Economic Sciences, Senior Researcher at the Department of Complex Problems of Hygiene and Human Ecology, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, Russia (e-mail: list@ufanet.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6481-0534>)

Akhat B. Bakirov - DSc (Medicine), Professor, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, Advisor to the Director of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology; Head of the Department of Therapy and Occupational Diseases with the Course of Additional Professional Education, Bashkir State Medical University, Ufa, Russia (e-mail: akhatb@bk.ru; тел.: 8 (347) 255-19-57; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3510-2595>).

Liliya K. Karimova - Doct. Sc. (Medicine), Chief Researcher at the Department of Complex Problems of Hygiene and Human Ecology of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology (e-mail: iao_karimova@rambler.ru; tel.: +7 (347)255-57-21; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4995-0854>)

Timur K. Valeev - PhD (Biology), Head of the Department of Complex Problems of Hygiene and Human Ecology, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, Russia (e-mail: valeevtk2011@mail.ru; тел.: 8 (347) 255-46-21; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7801-2675>).

Поступила/Received: 20.08.2026

Принята в печать/Accepted: 07.09.2026

УДК 613.632.2; 615.916

МЕХАНИЗМЫ ПУЛЬМОНОТОКСИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ НАНОЧАСТИЦ (ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР)

Гертан Н.А.¹, Минигалиева И.А.^{1,2}, Батенева В.А.¹, Слободчикова А.С.¹

¹ ФБУН «Екатеринбургский медицинский – научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора, Екатеринбург, Россия

² ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

Широкое применение наночастиц в промышленности и их способность проникать через биологические мембраны создают риски для здоровья работников промышленных предприятий и населения в целом. Легкие выступают одним из основных органов-мишеней.

Цель исследования – определить основные механизмы пульмонотоксического действия наночастиц на основе обзора современной научной литературы.

Материал и методы. Был проведен анализ научных работ в базах eLIBRARY.RU, PubMed, Google Scholar на русском и английском языках, по ключевым словам: токсичность, наночастицы, пульмонотоксичность, бронхолёгочная система, механизмы токсического действия, toxicity, nanoparticles, pulmonotoxicity, bronchopulmonary system, mechanisms. В обзор было включено 32 исследования НЧ.

Результаты. Описаны ключевые механизмы пульмонотоксического действия наночастиц. Окислительный стресс в основном проявляется дисбалансом прооксидантов и антиоксидантов. Наблюдаемое лёгочное воспаление сопровождается миграцией иммунных клеток и повышением провоспалительных цитокинов. Кроме того, наночастицы могут индуцировать в клетках лёгких и бронхов митохондриальную дисфункцию (снижение синтеза АТФ, повреждение крист), повреждение клеточных мембран, нарушения аутофагии, апоптоз и ферроптоз, а также оказывать генотоксические эффекты (повреждение дезоксирибонуклеиновой кислоты) и вызывать протеомные нарушения (изменение синтеза сурфактантных белков).

Ограничения исследования. В анализ были включены только публикации на русском и английском языках с 2016 по 2026 годы. Использование ограниченного

числа баз данных не исключает возможности пропуска релевантных исследований, опубликованных в других источниках.

Заключение. Пульмонотоксическое действие наночастиц представляет собой сложный процесс, в котором окислительный стресс, воспаление, митохондриальная дисфункция, нарушения аутофагии, апоптоз, генотоксичность и протеомные изменения тесно взаимосвязаны. Вариабельность эффектов в зависимости от свойств наночастиц указывает на необходимость дальнейших исследований для совершенствования гигиенического нормирования и разработки профилактических мероприятий.

Ключевые слова: наночастицы, пульмонотоксичность, бронхолегочная система, окислительный стресс, воспаление, митохондриальная дисфункция, апоптоз

Соблюдение этических стандартов: Проведение настоящего исследования не требовало одобрения этического комитета, поскольку работа не связана с использованием человека или животных в качестве объектов исследования.

Использование инструментов искусственного интеллекта: Авторы заявляют, что при подготовке настоящей рукописи системы искусственного интеллекта не применялись.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Гертан Н.А., Минигалиева И.А., Батенева В.А., Слободчикова А.С. Механизмы пульмонотоксического действия наночастиц (литературный обзор). Медицина труда и экология человека. 2026; 3 : 71-87.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10304>

Для корреспонденции: Наталья Александровна Гертан, e-mail: gertan00@mail.ru

MECHANISMS OF PULMONARY TOXICITY OF NANOPARTICLES: A LITERATURE REVIEW

Gertan N.A.¹, Minigalieva I.A.^{1,2}, Bateneva V.A.¹, Slobodchikova A.S.¹¹ Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, Russian Federation² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

The widespread use of nanoparticles in industry and their ability to penetrate biological membranes pose health risks to industrial workers and the general population, the lungs being one of the main target organs.

The aim of this study was to identify the key mechanisms of the pulmonary toxicity of nanoparticles based on the review of the recent scientific publications.

Materials and Methods. We searched the eLIBRARY.RU, PubMed, and Google Scholar databases using the following keywords in Russian and English: toxicity, nanoparticles, pulmonary toxicity, bronchopulmonary system, mechanisms of toxic action. Thirty-two publications on nanoparticles were included in the review.

Results. The key mechanisms of pulmonary toxicity of nanoparticles are described. Oxidative stress is primarily manifested by an imbalance between prooxidants and antioxidants. The observed pulmonary inflammation is accompanied by immune cell migration and an increase in proinflammatory cytokines. Furthermore, nanoparticles can induce mitochondrial dysfunction (decreased ATP synthesis, cristae damage), damage cell membranes, and disrupt autophagy, apoptosis, and ferroptosis in pulmonary and bronchial cells. They can also exert genotoxic effects (damage to deoxyribonucleic acid) and cause proteomic disturbances (altered surfactant protein synthesis).

Study limitations. Russian and English-language publications issued in 2016–2026 were included in the analysis. The use of a limited number of databases does not exclude that relevant studies published elsewhere were omitted.

Conclusion. Pulmonary toxicity of nanoparticles is a complex process in which oxidative stress, inflammation, mitochondrial dysfunction, disrupted autophagy, apoptosis, genotoxicity, and proteomic changes are closely interrelated. The variability of effects depending on the properties of nanoparticles indicates the need for further research to improve hygiene standards and develop preventive measures.

Keywords: nanoparticles, pulmonary toxicity, bronchopulmonary system, oxidative stress, inflammation, mitochondrial dysfunction, apoptosis

Compliance with ethical standards: This study did not require approval from an ethics committee, as it did not involve the use of humans or animals as research subjects.

Declaration of AI use: The authors declare that no artificial intelligence tools were used in the preparation of this manuscript.

Conflict of interest: The authors have no conflicts of interest to declare.

Funding: This research received no external funding.

For citation: Gertan N.A., Minigalieva I.A., Bateneva V.A., Slobodchikova A.S. Mechanisms of pulmonary toxicity of nanoparticles (literature review). Occupational Health and Human Ecology. 2026; 3:71-87.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10304>

For correspondence: Natalia A. Gertan, e-mail: gertan00@mail.ru

К наночастицам (НЧ) относят твёрдые частицы различной химической природы размером до 100 нм. Они могут образовываться в результате естественных и антропогенных причин. И если выделение НЧ в результате почвообразующих и литогенных процессов, извержения вулканов и лесных пожаров, т.е. из природных источников, относительно небольшое, то антропогенные источники, включая промышленные предприятия, городское строительство, транспортные выбросы и переработку отходов, могут представлять серьёзную угрозу здоровью населения [1, 2]. К тому же, НЧ применяются во многих областях промышленности, включая машиностроительную, химическую, пищевую и сельскохозяйственную отрасли, а также используются в медицине [3-5].

Несмотря на широкое распространение НЧ, их воздействие несёт потенциальные риски, связанные с биосовместимостью и долгосрочной токсичностью, для здоровья людей, особенно профессионально контактирующих с данным фактором [6]. Основными путями воздействия НЧ на человека являются ингаляционный и пероральный. Проникая в организм, они способны преодолевать биологические барьеры, в том числе аэрогематический, что может приводить к развитию общих токсических эффектов и поражению отдельных органов и систем (бронхолёгочная, сердечно-сосудистая, нервная, гепатобилиарная и др. системы) [7, 8].

Лёгкие могут выступать в качестве первичного или вторичного органа-мишени, при этом НЧ за счёт своего размера способны достигать глубоких отделов лёгких – альвеол и накапливаться в них и других эпителиальных или фагоцитарных клетках (макрофаги), оказывая продолжительное токсическое воздействие [9, 10].

Размер фракции может также влиять на степень прямого повреждения и воспалительный ответ [11, 12]. Кроме того, пульмонотоксичность НЧ зависит от их формы [11, 13], поверхностного заряда [12, 14], собственной химической природы [12] и химического состава их оболочки [11-13, 15], а также дозы и пути воздействия [12, 15-20]. Широкое распространение НЧ, их токсикокинетические и токсикодинамические особенности и многофакторность воздействия на бронхолёгочную систему делает актуальным комплексное изучение экспериментальных данных, включая исследования *in vivo* и *in vitro*, позволяющие выделить и более точно проследить взаимосвязи механизмов пульмонотоксического действия НЧ.

Цель исследования – изучение современной научной литературы по оценке механизмов пульмонотоксического действия НЧ.

Материал и методы. Поиск современных научных работ проводился в базах данных и электронных библиотеках eLIBRARY.RU, PubMed, Google Scholar на русском и английском языках по следующим ключевым словам: токсичность, наночастицы, пульмонотоксичность, бронхолёгочная система, механизмы токсического действия, *toxicity*, *nanoparticles*, *pulmonotoxicity*, *bronchopulmonary system*, *mechanisms*, *in vivo*, *in vitro*. Изучены списки литературы включенных исследований с целью поиска дополнительных статей. В качестве критерия включения выступали сведения об эффектах воздействия НЧ на бронхолёгочную систему. Были исключены исследования, описывающие действие частиц размером более 100 нм. Всего было включено 32 исследования (23 из них за последние 5 лет): 23 *in vivo*, и 8 *in vitro*, в том числе проведенных нами – 1. В обзор вошли исследования, направленные на изучение НЧ различных соединений Ti 7/32 (21,88%), Cu 6/32 (18,75%), Ag 5/32 (15,63%), Zn 4/32 (12,50%), C 4/32 (12,50%), Si 4/32 (12,50%), Ni 2/32 (6,25%), Ce 2/32 (6,25%), Al 2/32 (6,25%), Sn 1/32 (3,13%), V 1/32 (3,13%), CoFe 1/32 (3,13%), InSn 1/32 (3,13%).

Результаты и обсуждение. Одним из основных механизмов пульмонотоксического действия НЧ является окислительный стресс. НЧ могут индуцировать продукцию активных форм кислорода (АФК) как непосредственно на своей поверхности, так и при взаимодействии с макрофагами. При этом повышенная выработка АФК приводит к усилению перекисного окисления липидов в клеточных мембранах с одновременным снижением уровня антиоксидантов, которые нейтрализуют свободные радикалы кислорода [21]. А метаболический анализ выявил значительное участие в этих процессах путей, связанных с метаболизмом глутатиона и кофермента А [16].

Клеточные модели показали дозозависимое снижение продукции глутатиона и экспрессии генов, связанных с антиоксидантной защитой, в том числе генов супероксиддисмутазы-2 (*SOD2*), каталазы (*CAT*), глутатионпероксидазы (*GSH-Px*), глутатион *S*-трансфераза альфа 2 (*GSTA2*), глутатион *S*-трансфераза М 2 (*GSTM2*), а также вышестоящего фактора транскрипции – ядерного фактора эритроидного происхождения 2 (*NRF2*), и изменения НАДФН-оксидазы 2 (*NOX2*), что говорит не только об индуцированном НЧ (SiO_2 2, 10, 50 и 100 мкг/мл) окислительном стрессе на генетическом уровне, но и его связи с подавлением передачи сигналов *NRF2*, работой *NOX2* и снижением глутатиона [11, 16].

Кроме того, исследования *in vitro* выявили повышение уровней АФК, супероксиддисмутазы и каталазы при снижении глутатиона в ответ на воздействие НЧ (Si 2, 10 и 50 мкг/мл, VO_2 100 мкг/мл, SiO 100 мкг/мл, CuO 0,15 и 1,5 мг/кг м.т.) [11, 15, 16, 22]. Дисбаланс прооксидантов (малонового диальдегида (МДА), АФК, оксида азота) и антиоксидантов (глутатиона, супероксиддисмутазы, каталазы) наблюдался и в исследованиях *in vivo* в лёгких и бронхоальвеолярной жидкости (БАЛЖ) при воздействии различных НЧ (CeO_2 0,5 мг/кг массы тела (м.т.), NiO 1, 20, 150 мг/кг м.т., CoFe_2O_4 5 мг/кг м.т., InSnO 1,2, 3, 6 мг/кг м.т., Ag 100 мкг/мл) [20, 23-26] что подтверждает значимость окислительного стресса как одного из основных механизмов пульмонотоксического действия НЧ.

Известно, что развитие окислительного стресса тесно связано с воспалением [27, 28]. Однако при попадании в организм НЧ могут и самостоятельно провоцировать воспалительный ответ, так как воспринимаются иммунной системой как чужеродные агенты. При этом индуцированная НЧ воспалительная реакция, в основном, проходит с участием Т-лимфоцитов, посредством секреции хемокинов и индукции каскада воспалительных реакций [26, 29, 30], пусковым механизмом которого является активация инфламмосомы, вероятно, спровоцированная нарушением ионного баланса (притока K^+) и повреждением лизосом [12, 31, 32]. Рассматривая различные экспериментальные модели, можно отметить повышение уровней провоспалительных цитокинов в исследованиях *in vitro* - НЧ (SiO 100 мкг/мл, Ag 1–100 мкг/мл) вызывали повышение интерлейкинов (ИЛ) ИЛ-1 β , ИЛ-6, ИЛ-8 и хемокинов [11, 26], и в исследованиях *in vivo* - НЧ (CeO_2 0,5 мг/кг м.т., SiO 400 мкг/животное, CuO 32,5 мкг/м³, 2,4, 3,3, 3,5, 6,3 и 13,2 мг/м³, 0,15 и 1,5 мг/кг м.т., Al 20 и 40 мг/кг м.т. и In/Sn 1,2, 3, 6 мг/кг м.т.) повышали уровни ИЛ-1 β , ИЛ-4, ИЛ-5, ИЛ-6, ИЛ-12p70, ИЛ-13, фактора некроза опухоли-а (ФНО-а), интерферона- γ [11, 22, 23, 25, 29, 33, 34], а также вызывали воспалительные гистологические изменения лёгких [11, 17, 24, 25, 28, 34], что явно указывает на развитие воспаления в ответ на воздействие различных НЧ. Кроме того,

исследование НЧ CoFe_2O_4 (0,5 и 5 мг/кг м.т.) показало изменения экспрессии генов *ФНО- α* , *ИЛ-1 β* , *ИЛ-10* и трансформирующего фактора роста бета-1 (*TGF-1 β*) [24] – одного из важнейших фиброгенных цитокинов [35], что может свидетельствовать о значимости воспаления как механизма пульмонотоксичности НЧ на генетическом уровне.

Цитокиновый шторм в свою очередь, усиливает миграцию фагоцитарных клеток в альвеолярное пространство и интерстиций и активирует резидентные иммунные клетки [12, 31, 32]. Изменения состава иммунных клеток оценивали в основном с помощью анализа БАЛЖ, при этом различные НЧ (Cu 2,6 и 12 мкг/мышь, CuO 3,5 мг/м³, Al 54 мкг/мышь, 20 и 40 мг/кг м.т., Sn 162 мкг/мышь, Zn 0,7 мкг/мышь, Ti 162 мкг/мышь, In/Sn 1,2, 3, 6 мг/кг м.т., Si 3 мг/кг м.т. и 6 мг/кг м.т.) вызывали как повышение количества нейтрофилов [33, 34, 36], альвеолярных макрофагов [25, 33, 34], эозинофилов и атипичных клеток [33], так и снижение нейтрофилов и естественных киллеров [37]. Разнонаправленные изменения состава иммунных клеток, вероятно, обусловлены их транслокацией в тканях и изменением продукции после воздействия НЧ, что во многом зависит от условий проведения экспериментов и природы НЧ [11, 12]. Кроме того, ранее нами был апробирован метод цитологической характеристики отпечатков лёгких, который показал схожее с БАЛЖ увеличение долей альвеолярных макрофагов (нормальных и дегенеративных) и нейтрофилов в мазках-отпечатках лёгких в ответ на воздействие НЧ NiO ($0,23 \pm 0,01$ мг/м³) [38].

Также известно фиброгенное действие НЧ (Si 1,5, 3,0 или 6,0 мг/кг м.т., ZnO 200, 400 и 800 мкг/кг, C 5, 30 мг/м³ и 50, 100 и 200 мкг/мл, CeO_2 12,5-25 мкг/мл) на лёгкие [37, 39-41], вероятно, связанное с активацией инфламмасомы NOD-, LRR- и пириндомен-содержащего белка 3 (NLRP3) [40], нарушением экспрессии *TGF- β 1*, обусловленным влиянием НЧ на пути сфингозинкиназы 1 - сфингозин-1-фосфата (SPHK1-S1P) и *SMAD2-3* [41] и митохондриальной дисфункцией, опосредованной активацией НАДФН-оксидазы 4, что в совокупности индуцирует эпителиально-мезенхимальный переход, являющийся ключевым этапом фиброза эпителиальных клеток [14].

Помимо воспаления НЧ при проникновении в клетки способны вызывать чрезмерную аутофагию, что приводит к повреждению лизосом и митохондрий (митофагия) и активации окислительного стресса, в то время как ингибирование аутофагии, вызванное блокировкой белка аутофагии 5, значительно снижало индуцированное НЧ (графен 50 мг/кг м.т.) повреждение клеток и окислительный стресс [42]. С другой стороны, нарушение аутофагических процессов, вызванное

воздействием НЧ Ag (40–160 мкг/мл) и Cu (1,25, 2,5 и 5 мг/кг м.т.), усугубляло лёгочное повреждение, что авторы связывали с замедлением деградации субстратов убиквитинирования, накоплением нуклеопротеина p62 и аномальных митохондрий с избытком ионов [18, 43]. Таким образом, нарушение аутофагических процессов приводит к дисфункции клеток и в конечном итоге их разрушению, в том числе посредством апоптоза.

Известно, что значительную роль в развитие индуцированных НЧ (Ag 40–160 мкг/мл, 320 мкг/мл) апоптических процессах в клетках лёгких играют митохондриально-зависимый путь регулятора апоптоза Bcl2/, ассоциированного с Bcl2 белка X (Bcl2/Bax), посредством которого осуществляется высвобождение цитохрома C, что приводит к образованию апоптосомы, которая активирует каспазу-3 и каспазу-9 [43, 44]. Результаты исследования *in vivo* подтверждают роль апоптоза в пульмонотоксическом действии НЧ (NiO 1, 20, 150 мг/кг м.т.), в том числе на генетическом уровне, проявляющегося увеличением экспрессии проапоптотического гена опухолевого белка p53 в тканях лёгких крыс [20].

Другим возможным механизмом клеточной гибели при воздействии НЧ является ферроптоз, индуцируемый нарушением синтеза глутатиона, ингибированием глутатионпероксидазы 4, митохондриальными повреждениями, что ведёт к внутриклеточной перегрузке железом и накоплению перекисей липидов. Так, ферроптотическое повреждение лёгких наблюдалось у мышей при исследовании НЧ Ag (1 мг/кг) и было связано с ингибированием пути NRF2/ гемоксигеназа 1 (HO-1), что дополнительно подтверждалось *in vitro* на клетках бронхиального эпителия человека (НЧ Ag 320 мкг/мл) [44].

Реализация механизмов пульмонотоксического действия НЧ связана с повышенной проницаемостью клеточных мембран и нарушением гомеостаза. НЧ (Ag 100 мкг/мл *in vitro*, 50 мкг/мышь *in vivo*) могут индуцировать в лёгочных клетках деполяризацию клеточной мембраны, способствовать повышению внутриклеточного уровня натрия и кальция и тем самым нарушать работу Na⁺/K⁺-АТФазы, что в итоге приводит к разрушению клеток [45]. Кроме того, есть данные о негативном влиянии НЧ (Si 2, 10 и 50 мкг/мл, TiO₂ 25, 50, 100 мкг/л) на метаболизм компонентов мембраны клеток бронхиального эпителия человека, обуславливающим их структурные повреждения и дисфункцию посредством значительного изменения уровней лизофосфатидилхолина, фосфатидилхолина [16] и других метаболитов, в основном относящимся к жирным кислотам, глицерофосфолипидам, стероидам и их производным, сфинголипидам и пренольным липидам [46].

Так или иначе проникновение НЧ в клетки приводит к нарушению работы отдельных её структур, в том числе митохондрий. Рассматривая подробнее индуцированное НЧ митохондриальное повреждение клеток лёгких, можно отметить структурные и метаболические изменения митохондрий, существенно влияющие на жизнеспособность и функциональность клеток и тканей органов бронхолёгочной системы. Изучение токсических эффектов НЧ (Si 2, 10 и 50 мкг/мл) на клетки бронхиального эпителия человека BEAS-2B показало значительное угнетение митохондриальной функции, связанное с ингибированием протонного потенциала, основного дыхания, синтеза АТФ и резервной дыхательной способности клеток, а также снижением уровней компонентов митохондриального электронно-транспортного комплекса (METC) (комплексы I, III, IV, V), что могло быть обусловлено структурными изменениями в виде разрывов и исчезновения крист [16]. Структурные повреждения и дисфункцию митохондрий при воздействии различных НЧ (Ag 40–160 мкг/мл, C 2 мкг/мл, ZnO 1, 2 и 4 мг/кг м.т.) отмечали также в клетках лёгких *in vitro* и *in vivo* [28, 43, 47]. При этом, как упоминалось ранее, данный механизм тесно взаимосвязан с процессами окислительного стресса, воспаления и аутофагии, апоптоза, что в совокупности расширяет представления о механизмах пульмонотоксического воздействия НЧ и роли митохондриального повреждения в них.

Кроме того, пульмонотоксическое действие НЧ тесно связано с генетическими нарушениями, в том числе обусловленными изменениями репликации или самой структуры дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК). Так, исследование Han B. и соавт. показало, что наночастицы TiO_2 (0,2, 1 г/кг м.т.) могут вызывать повреждения ДНК в лёгких и тем самым активировать процессы репарации [48]. Наблюдаемое повреждение ДНК может объясняться прямым механическим воздействием НЧ, нарушающим взаимодействие гамет, или косвенным повреждением через увеличение АФК [23, 48, 49].

Значимость данного механизма обусловлена также возможностью прогнозирования влияния НЧ на развитие заболеваний бронхолёгочной системы. Так, в ходе анализа взаимодействия дифференциально экспрессируемых генов в клетках альвеолярных макрофагов, альвеолярных клетках II типа и фибробластах лёгких крыс, подверженных воздействию НЧ Si (1,5, 3,0 или 6,0 мг/кг м.т.), было установлено, что 10 из 13 генов семейства белков теплового шока участвуют в повреждении легких и легочных заболеваниях, в том числе посредством индуцирования других токсических механизмов: сигнального пути апоптоза, иммунного ответа, денатурации белков и реакции на активные формы кислорода.

А ген семейства белков теплового шока D 1 (Hspd1) может быть важным индикатором интерстициального повреждения легких, вызванного НЧ [37].

Индукцированные НЧ генетические нарушения, изменения продукции белков и их денатурация могут напрямую или косвенно влиять на функциональную активность и жизнеспособность клеток лёгких, что также может быть одним из механизмов пульмонотоксического действия НЧ. Протеомный анализ легких крыс, подвергшихся воздействию НЧ (CuO 0,15 и 1,5 мг/кг м.т., Si 1,5, 3,0 или 6,0 мг/кг м.т.), показал изменения продукции белков, связанных с деградацией белковых агрегатов и ответной активацией компенсаторных механизмов, направленных на снижение индуцированных НЧ воспаления, апоптоза и генотоксичности [22, 37]. К тому же, при воздействии НЧ (TiO₂ 25, 50, 100, 150 и 200 мкг/мл и ZnO 2,5, 5,0, 10, 15 и 20 мкг/мл) было зафиксировано снижение специфического сурфактантного белка А на фоне устойчивой воспалительной реакции и окислительного стресса в клетках лёгких (A549), что может приводить к повреждению клеток и нарушению функции легких [50].

В то же время, белковые нарушения могут быть напрямую индуцированы НЧ, что подтверждается результатами исследования Baiyan S. и соавт., которые отмечали при воздействии НЧ (Ti₃C₂ 20 мг/кг м.т.) развитие дыхательной дисфункции у мышей, связанной с подавлением продукции легочного сурфактантного белка В в альвеолярных эпителиальных клетках, при отсутствии воспалительных и гистопатологических изменений [51].

Вариабельность ответных реакций организма подчёркивает сложность взаимодействия различных механизмов токсического действия НЧ на бронхолёгочную систему.

Заключение. Таким образом, пульмонотоксическое действие НЧ представляет собой сложный многоуровневый процесс, в котором основные механизмы токсического воздействия НЧ на бронхолёгочную систему, представленные окислительным стрессом (НЧ Si, Ag, Cu, Ce, Ni, CoFe), воспалением (НЧ Si, Ag, Cu, Ce, Ni, CoFe, Al, C, Zn, InSn, Ti), аутофагией (НЧ Ag, Cu), апоптозом (НЧ Ag, Ni), дисфункцией клеточной мембраны и митохондрий (НЧ Ag, Si, Ti, C, Zn), генотоксичностью и протеомными изменениями (НЧ Ti, Si, Cu, Zn), тесно связаны между собой, но при этом могут реализовываться независимо друг от друга и активироваться различными путями. Подобная вариабельность развития пульмонотоксических эффектов, индуцированных НЧ, указывает на необходимость дальнейшего изучения их механизмов и путей реализации на

различных уровнях организации жизни для подтверждения имеющихся данных и выявления новых путей, характера их взаимодействия.

Собранные литературные данные обобщают и систематизируют научные сведения о механизмах пульмонотоксического действия НЧ, что может быть использовано с целью дальнейшего совершенствования гигиенического нормирования и разработки профилактических мероприятий для рабочих промышленных предприятий, контактирующих с различными НЧ, и населения в целом.

Вклад авторов

Концепция и дизайн исследования – Минигалиева И.А.

Сбор и обработка литературных данных – Гертан Н.А., Батенева В.А., Слободчикова А.С.

Написание текста и оформление статьи – Гертан Н.А., Слободчикова А.С.

Все соавторы – редактирование, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех ее частей.

Author contributions:

Study conception and design – Minigalieva I.A.

Literature data collection and processing – Gertan N.A., Bateneva V.A., Slobodchikova A.S.

Draft manuscript preparation and design – Gertan N.A., Slobodchikova A.S.

All co-authors – editing, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all its parts.

Список литературы / References

1. Ivaneev A., Brzhezinskiy A., Karandashev V., et al. Nanoparticles of dust as an emerging contaminant in urban environments. *Environ Geochem Health*. 2024;46(10):367. DOI 10.1007/s10653-024-02139-4.
2. Aslam I., Roeffaers M.B.J. Carbonaceous nanoparticle air pollution: toxicity and detection in biological samples. *Nanomaterials*. 2022;12(22):3948. DOI 10.3390/nano12223948.
3. Yusuf A., Almotairy A.R.Z., Henidi H., et al. Nanoparticles as drug delivery systems: a review of the implication of nanoparticles' physicochemical properties on responses in biological systems. *Polymers*. 2023;15(7). doi:10.3390/polym15071596.
4. Malik S., Muhammad K., Waheed Y. Emerging applications of nanotechnology in

- healthcare and medicine. *Molecules*. 2023;28(18):e86624. DOI 10.3390/molecules28186624.
5. Malik S., Muhammad K., Waheed Y. Nanotechnology: A Revolution in Modern Industry. *Molecules*. 2023;28(2):661. DOI 10.3390/molecules28020661.
6. Fortune A., Aime A., Raymond D., Kumar S. Nanotechnology in medicine: a double-edged sword for health outcomes. *Health Nanotechnology*. 2025;1(1):9. DOI 10.1186/s44301-025-00008-2.
7. Yin X.-H., Xu Y.-M., Lau T.Y. Nanoparticles: Excellent Materials Yet Dangerous When They Become Airborne. *Toxics*. 2022;10(2). DOI 10.3390/toxics10020050.
8. Ajdary M., Keyhanfar F., Moosavi M.A., et al. Potential toxicity of nanoparticles on the reproductive system animal models: A review. *Journal of reproductive immunology*. 2021;148:103384. DOI 10.1016/j.jri.2021.103384.
9. Sonwani S., Madaan S., Arora J., et al. Inhalation Exposure to Atmospheric Nanoparticles and Its Associated Impacts on Human Health: A Review. *Frontiers in Sustainable Cities*. 2021;3. DOI 10.3389/frsc.2021.690444.
10. Liu Q., Zhang X., Xue J., et al. Exploring the intrinsic micro-/nanoparticle size on their in vivo fate after lung delivery. *Journal of Controlled Release*. 2022;347:435-448. DOI 10.1016/j.jconrel.2022.05.006.
11. Inoue M., Sakamoto K., Suzuki A., et al. Size and surface modification of silica nanoparticles affect the severity of lung toxicity by modulating endosomal ROS generation in macrophages. *Particle and Fibre Toxicology*. 2021;18(1):21. DOI 10.1186/s12989-021-00415-0.
12. Pavlin M., Lojk J., Strojan K., et al. The Relevance of Physico-Chemical Properties and Protein Corona for Evaluation of Nanoparticles Immunotoxicity—In Vitro Correlation Analysis on THP-1 Macrophages. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(11). DOI 10.3390/ijms23116197.
13. Nieves Lira C., Carpenter A.P., Baio J.E., et al. Size- and Shape-Dependent Interactions of Lipid-Coated Silver Nanoparticles: An Improved Mechanistic Understanding through Model Cell Membranes and In Vivo Toxicity. *Chemical Research in Toxicology*. 2024;37(6):968-980. DOI 10.1021/acs.chemrestox.4c00053.
14. Halimu G., Zhang Q., Liu L., et al. Toxic effects of nanoplastics with different sizes and surface charges on epithelial-to-mesenchymal transition in A549 cells and the potential toxicological mechanism. *Journal of Hazardous Materials*. 2022;430:128485. DOI 10.1016/j.jhazmat.2022.128485.
15. Xi W., Tang H., Liu Y., et al. Cytotoxicity of vanadium oxide nanoparticles and titanium dioxide-coated vanadium oxide nanoparticles to human lung cells. *Journal of Applied Toxicology*. 2020;40(5):567-577. DOI 10.1002/jat.3926.

16. Zhao X., Abulikemu A., Lv S., et al. Oxidative stress- and mitochondrial dysfunction-mediated cytotoxicity by silica nanoparticle in lung epithelial cells from metabolomic perspective *Chemosphere*. 2021;275:129969. DOI 10.1016/j.chemosphere.2021.129969.
17. Gosens I., Cassee F.R., Zanella M., et al. Organ burden and pulmonary toxicity of nano-sized copper (II) oxide particles after short-term inhalation exposure. *Nanotoxicology*. 2016;10(8):1084-1095. DOI 10.3109/17435390.2016.1172678.
18. Xiao J., Tu B., Zhou X., et al. Autophagy deficiency exacerbates acute lung injury induced by copper oxide nanoparticles. *Journal of Nanobiotechnology*. 2021;19(1):162. DOI 10.1186/s12951-021-00909-1.
19. Abdulqadir S.Z. Pulmonary toxic responses to intraperitoneal administration of nickel nanoparticles in male rats. *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences*. 2025;37(5):1-11. DOI 10.21271/ZJPAS.37.5.1.
20. Fidan E.B., Bali E.B., Apaydin F.G. Comparative study of nickel oxide and nickel oxide nanoparticles on oxidative damage, apoptosis and histopathological alterations in rat lung tissues. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2024;83:127379. DOI 10.1016/j.jtemb.2023.127379.
21. Mulakov S.P., Gotovtsev P.M., Gainanova A.A., et al. Generation of the Reactive Oxygen Species on the surface of nanosized titanium(IV) oxides particles under UV-irradiation and their connection with photocatalytic properties. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2020;393:112424. DOI 10.1016/j.jphotochem.2020.112424.
22. Kwon J.-T., Kim Y., Choi S., et al. Pulmonary Toxicity and Proteomic Analysis in Bronchoalveolar Lavage Fluids and Lungs of Rats Exposed to Copper Oxide Nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(21). DOI 10.3390/ijms232113265.
23. Nemmar A., Yuvaraju P., Beegam S., et al. Cerium Oxide Nanoparticles in Lung Acutely Induce Oxidative Stress, Inflammation, and DNA Damage in Various Organs of Mice. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2017;2017(1). DOI 10.1155/2017/9639035.
24. Hassanen E.I., Abdelrahman R.E., Aboul-Ella H., et al. Mechanistic Approach on the Pulmonary Oxido-Inflammatory Stress Induced by Cobalt Ferrite Nanoparticles in Rats. *Biological Trace Element Research*. 2024;202(2):765-777. DOI 10.1007/s12011-023-03700-5.
25. Liu N., Guan Y., Zhou C., et al. Pulmonary and Systemic Toxicity in a Rat Model of Pulmonary Alveolar Proteinosis Induced by Indium-Tin Oxide Nanoparticles. *International Journal of Nanomedicine*. 2022;17:713-731. DOI 10.2147/IJN.S338955.
26. Galbiati V., Cornaghi L., Gianazza E., et al. In vitro assessment of silver nanoparticles

immunotoxicity. Food and chemical toxicology : an international journal published for the British Industrial Biological Research Association. 2018;112:363-374. DOI 10.1016/j.fct.2017.12.023.

27. Mokhtari-Zaer A., Norouzi F., Askari V.R., et al. The protective effect of *Nigella sativa* extract on lung inflammation and oxidative stress induced by lipopolysaccharide in rats. Journal of Ethnopharmacology. 2020;253:112653. DOI 10.1016/j.jep.2020.112653.

28. Zhuo L.-B., Liu Y.-M., Jiang Y., Yan Z. Zinc oxide nanoparticles induce acute lung injury via oxidative stress-mediated mitochondrial damage and NLRP3 inflammasome activation: In vitro and in vivo studies. Environmental Pollution. 2024;341:122950. DOI 10.1016/j.envpol.2023.122950.

29. Tulinska J., Mikusova M.L., Liskova A., et al. Copper Oxide Nanoparticles Stimulate the Immune Response and Decrease Antioxidant Defense in Mice After Six-Week Inhalation. Frontiers in Immunology. 2022;13. DOI 10.3389/fimmu.2022.874253.

30. Ninan N., Goswami N., Vasilev K. The Impact of Engineered Silver Nanomaterials on the Immune System. Nanomaterials (Basel, Switzerland). 2020;10(5). DOI 10.3390/nano10050967.

31. Nho R. Pathological effects of nano-sized particles on the respiratory system. Nanomedicine: nanotechnology, biology, and medicine. 2020;29:102242. DOI 10.1016/j.nano.2020.102242.

32. Aschner M., Skalny A.V., Martins A.C., et al. The role of NLRP3 inflammasome activation in proinflammatory and cytotoxic effects of metal nanoparticles. Archives of Toxicology. 2025;99(4):1287-1314. DOI 10.1007/s00204-025-03972-x.

33. Lim J.-O., Kim W.-I., Pak S.-W., et al. Toll-like receptor 4 is a key regulator of asthma exacerbation caused by aluminum oxide nanoparticles via regulation of NF- κ B phosphorylation. Journal of Hazardous Materials. 2023;448:130884. DOI 10.1016/j.jhazmat.2023.130884.

34. Areecheewakul S., Adamcakova-Dodd A., Haque E., et al. Time course of pulmonary inflammation and trace element biodistribution during and after sub-acute inhalation exposure to copper oxide nanoparticles in a murine model. Particle and Fibre Toxicology. 2022;19(1):40. DOI 10.1186/s12989-022-00480-z.

35. Gungor H., Ekici M., Onder Karayigit M., et al. Zingerone ameliorates oxidative stress and inflammation in bleomycin-induced pulmonary fibrosis: modulation of the expression of TGF- β 1 and iNOS. Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology. 2020;393(9):1659-1670. DOI 10.1007/s00210-020-01881-7.

36. Gutierrez C.T., Loizides C., Hafez I., et al. Acute phase response following pulmonary exposure to soluble and insoluble metal oxide nanomaterials in mice. Particle and Fibre Toxicology. 2023;20(1):4. DOI 10.1186/s12989-023-00514-0.

37. Li Y., Yao Q., Xu H., et al. Lung Single-Cell Transcriptomics Offers Insights into the Pulmonary Interstitial Toxicity Caused by Silica Nanoparticles. *Environment & Health*. 2024;2(11):786-801. DOI 10.1021/envhealth.4c00052.
38. Sutunkova M.P., Solovyeva S.N., Minigalieva I.A., et al. Toxic Effects of Low-Level Long-Term Inhalation Exposures of Rats to Nickel Oxide Nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019;20(7):1778. DOI 10.3390/ijms20071778.
39. Wang D., Li H., Liu Z., et al. Acute toxicological effects of zinc oxide nanoparticles in mice after intratracheal instillation. *International journal of occupational and environmental health*. 2017;23(1):11-19. DOI 10.1080/10773525.2016.1278510.
40. Zhou L., Li P., Zhang M., et al. Carbon black nanoparticles induce pulmonary fibrosis through NLRP3 inflammasome pathway modulated by miR-96 targeted FOXO3a. *Chemosphere*. 2020;241:125075. DOI 10.1016/j.chemosphere.2019.125075.
41. Cui L., Wang X., Zhao X., et al. CeO(2) nanoparticles induce pulmonary fibrosis via activating S1P pathway as revealed by metabolomics. *Nano today*. 2022;45. DOI 10.1016/j.nantod.2022.101559.
42. Zhang L., Ouyang S., Zhang H., et al. Graphene oxide induces dose-dependent lung injury in rats by regulating autophagy. *Experimental and Therapeutic Medicine*. 2021;21(5):462. DOI 10.3892/etm.2021.9893.
43. Li J., Chang X., Shang M., et al. Mitophagy-lysosomal pathway is involved in silver nanoparticle-induced apoptosis in A549 cells. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021;208:111463. DOI 10.1016/j.ecoenv.2020.111463.
44. Zhang X., Li M., Wu H., et al. Naringenin attenuates inflammation, apoptosis, and ferroptosis in silver nanoparticle-induced lung injury through a mechanism associated with Nrf2/HO-1 axis: In vitro and in vivo studies. *Life Sciences*. 2022;311:121127. DOI 10.1016/j.lfs.2022.121127.
45. Li L., Bi Z., Hu Y., et al. Silver nanoparticles and silver ions cause inflammatory response through induction of cell necrosis and the release of mitochondria in vivo and in vitro. *Cell Biology and Toxicology*. 2021;37(2):177-191. DOI 10.1007/s10565-020-09526-4.
46. Zhang J., Shi J., Han S., et al. Titanium dioxide nanoparticles induced reactive oxygen species (ROS) related changes of metabolomics signatures in human normal bronchial epithelial (BEAS-2B) cells. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2022;444:116020. DOI 10.1016/j.taap.2022.116020.
47. Caruso G., Fresta C.G., Costantino A., et al. Lung Surfactant Decreases Biochemical Alterations and Oxidative Stress Induced by a Sub-Toxic Concentration of Carbon Nanoparticles in Alveolar Epithelial and Microglial Cells. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(5):2694. DOI 10.3390/ijms22052694.

48. Han B., Pei Z., Shi L., et al. TiO₂ Nanoparticles Caused DNA Damage in Lung and Extra-Pulmonary Organs Through ROS-Activated FOXO3a Signaling Pathway After Intratracheal Administration in Rats. *International Journal of Nanomedicine*. 2020;15:6279-6294. DOI 10.2147/IJN.S254969.
49. Ramos-Pan L., Touzani A., Fernández-Bertólez N., et al. Impact of gold nanoparticle exposure on genetic material. *Mutation research. Genetic toxicology and environmental mutagenesis*. 2024;900:503827. DOI 10.1016/j.mrgentox.2024.503827.
50. Jiménez-Chávez A., Solorio-Rodríguez A., Escamilla-Rivera V., et al. Inflammatory response in human alveolar epithelial cells after TiO₂ NPs or ZnO NPs exposure: Inhibition of surfactant protein A expression as an indicator for loss of lung function. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 2021;86:103654. DOI 10.1016/j.etap.2021.103654.
51. Sui B., Liu X., Sun J. Biodistribution, inter-/intra-cellular localization and respiratory dysfunction induced by Ti₃C₂ nanosheets: Involvement of surfactant protein down-regulation in alveolar epithelial cells. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;402:123562. DOI 10.1016/j.jhazmat.2020.123562.

Информация об авторах

Наталья Александровна Гертан – младший научный сотрудник отдела токсикологии и биопрофилактики ФБУН ЕМНЦ ПЗОРПП Роспотребнадзора (620014, г. Екатеринбург, e-mail: gertan00@mail.ru; тел.: 8 (343) 253-11-05, ORCID iD: 0009-0008-3239-5998).

Ильзира Амировна Минигалиева – доктор биологических наук, заведующая отделом токсикологии и биопрофилактики ФБУН «ЕМНЦ ПЗОРПП» Роспотребнадзора (620014, г. Екатеринбург); главный научный сотрудник лаборатории стохастического транспорта наночастиц в живых системах ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (620062, г. Екатеринбург); e-mail: ilzira@ymrc.ru; тел.: 8 (343) 253-12-85. ORCID iD: 0000-0002-0097-7845.

Влада Андреевна Батенева – младший научный сотрудник отдела токсикологии и биопрофилактики ФБУН ЕМНЦ ПЗОРПП Роспотребнадзора (620014, г. Екатеринбург, e-mail: bateneva@ymrc.ru; тел.: 8 (343) 253-11-05, ORCID iD: 0000-0002-4694-0175).

Александра Сергеевна Слободчикова – лаборант-исследователь отдела токсикологии и биопрофилактики ФБУН ЕМНЦ ПЗОРПП Роспотребнадзора (620014, г. Екатеринбург, e-mail: slobodchikovaas@ymrc.ru, ORCID iD: 0009-0000-4208-5469).

Author Information

Natalia A. Gertan – Junior Researcher, Department of Toxicology and Bioprophylaxis, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg); e-mail: gertan00@mail.ru; tel.: +7 (343) 253-11-05; ORCID iD: 0009-0008-3239-5998.

Ilzira A. Minigalieva – Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Toxicology and Bioprophylaxis, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg); Chief Researcher, Laboratory of Stochastic Transport of Nanoparticles in Living Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620062, Yekaterinburg); e-mail: ilzira@ymrc.ru; tel. +7 (343) 253-12-85; ORCID iD: 0000-0002-0097-7845.

Vlada A. Bateneva – Junior Researcher, Department of Toxicology and Bioprophylaxis, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg); e-mail: bateneva@ymrc.ru; tel.: +7 (343) 253-11-05; ORCID iD: 0000-0002-4694-0175.

Alexandra S. Slobodchikova – Laboratory Research Assistant, Department of Toxicology and Bioprophylaxis, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg); e-mail: slobodchikovaas@ymrc.ru; tel.: +7 (343) 253-11-05; ORCID iD: 0009-0000-4208-5469.

Поступила/Received: 30.06.2026

Принята в печать/Accepted: 15.07.2026

УДК 613.6:616.084:616.056.3:001.8

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОФИЛАКТИКИ АЛЛЕРГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ У ЛИЦ, КОНТАКТИРУЮЩИХ С ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ АЛЛЕРГЕНАМИ И ИРРИТАНТАМИ

Борисова А.И.¹, Бакиров А.Б.^{1,2,3}, Абдрахманова Е.Р.^{1,2}, Зайдуллин И.И.¹,
Кабирова Э.Ф.¹, Галимова Е.С.², Галимова Р.Р.^{1,2}, Дистанова А.А.¹, Рафикова Л.И.¹

¹ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», Уфа, Россия

²ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет»
Минздрава России, Уфа, Россия

³Академия наук Республики Башкортостан, Уфа, Россия

Профессиональная экспозиция аллергенов и раздражителей может влиять на формирование и течение бронхиальной астмы, аллергического дерматита и хронической крапивницы. При этом риск формирования заболевания определяется не только интенсивностью контакта, но и индивидуальной генетической предрасположенностью, нейроиммунными механизмами и психоэмоциональной нагрузкой.

Цель. Разработать и научно обосновать модель ранней диагностики и персонализированной профилактики аллергических заболеваний у лиц трудоспособного возраста, подвергающихся воздействию производственных аллергенов и раздражителей.

Материалы и методы. Выполнен анализ данных многолетних последовательных этапов исследования: эпидемиологической оценки, клинико-функционального и психометрического обследования, определения субстанции Р и вазоинтестинального пептида, молекулярно-генетического тестирования и разработки профилактических алгоритмов. На завершающем этапе обследованы 148 пациентов со среднетяжелой и тяжелой бронхиальной астмой. В молекулярно-генетическое исследование включены 88 пациентов и 60 лиц контрольной группы.

Результаты. Выделены профессиональные группы повышенного риска: работники здравоохранения - для аллергического дерматита и хронической крапивницы, работники сельского хозяйства и строительства - для бронхиальной астмы. У контактировавших с аллергенами и раздражителями пациентов с бронхиальной астмой выявлены прямые корреляции уровня субстанции Р с ситуативной ($r=0,649$;

$p=0,0020$) и личностной тревожностью ($r=0,570$; $p=0,0087$). Установлены ассоциации ряда полиморфных вариантов генов нейропептидной регуляции, метаболизма ксенобиотиков и иммунного ответа с респираторной и кожной аллергопатологией. На основании полученных данных разработаны алгоритмы персонифицированного наблюдения работников и лабораторной диагностики профессиональных аллергических заболеваний.

Ограничения исследования. Для ряда нейропептидных зависимостей статистическая значимость не была достигнута. Отсутствие проспективной внешней валидации пока не позволяет использовать предложенные маркеры как самостоятельный инструмент допуска к профессии или установления связи заболевания с работой.

Заключение. Многолетний цикл исследований обосновал переход от оценки изолированной экспозиции к комплексной риск-ориентированной модели, объединяющей профессиональный анамнез, клинико-функциональные показатели, психоэмоциональный статус, нейропептидные и молекулярно-генетические маркеры.

Ключевые слова: профессиональные аллергические заболевания, бронхиальная астма, аллергический дерматит, нейрогенное воспаление, субстанция P, вазоинтестинальный пептид, риск, персонифицированная профилактика

Соблюдение этических стандартов: все пациенты были информированы об исследовании, протокол которого выполнен в соответствии с Хельсинкской декларацией (ред. 2013 г.) и одобрен локальным комитетом по биомедицинской этике ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека».

Использование инструментов искусственного интеллекта: при подготовке рукописи был использован GigaChat-2 для проверки орфографии текста на английском языке. Все научные интерпретации, анализ данных и выводы выполнены авторами самостоятельно; авторы несут полную ответственность за содержание статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: работа выполнена в рамках отраслевой научно-исследовательской программы Роспотребнадзора на 2021-2025 гг., п. 2.1.9 (рег. № НИОКТР 121062100044-1); дополнительная спонсорская поддержка отсутствовала.

Для цитирования: Борисова А.И., Бакиров А.Б., Абдрахманова Е.Р., Зайдуллин И.И., Кабирова Э.Ф., Галимова Е.С., Галимова Р.Р., Дистанова А.А., Рафикова Л.И.

Научное обоснование профилактики аллергических заболеваний у лиц, контактирующих с производственными аллергенами и ирритантами. Медицина труда и экология человека. 2026; 3 : 88 -105.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10305>

Для корреспонденции: Алла Ивановна Борисова, alla.borisova.ufa@gmail.com

SCIENTIFIC RATIONALE FOR THE PREVENTION OF ALLERGIC DISEASES IN INDIVIDUALS EXPOSED TO OCCUPATIONAL ALLERGENS AND IRRITANTS

Borisova A.I.¹, Bakirov A.B.^{1,2,3}, Abdrakhmanova E.R.^{1,2}, Zaydullin I.I.¹, Kabirova E.F.¹, Galimova E.S.², Galimova R.R.^{1,2}, Distanova A.A.¹, Rafikova L.I.¹

¹Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, Russia

²Bashkir State Medical University, Ufa, Russia

³Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, Ufa, Russia

Occupational exposure to allergens and irritants can affect the development and course of bronchial asthma, allergic dermatitis, and chronic urticaria. Moreover, the risk of disease development is determined not only by the intensity of exposure but also by individual genetic predisposition, neuroimmune mechanisms, and psycho-emotional stress.

The purpose of the study. To develop and scientifically substantiate a model for the early diagnosis and personalized prevention of allergic diseases in working-age individuals exposed to occupational allergens and irritants.

Materials and methods. An analysis was performed using data obtained at successive stages of a long-term study, including epidemiological assessment, clinical and functional evaluation, psychometric assessment, measurement of substance P and vasoactive intestinal peptide levels, molecular genetic testing, and the development of preventive algorithms. At the final stage, 148 patients with moderate-to-severe bronchial asthma were examined. The molecular genetic study included 88 patients and 60 controls.

Results. High-risk occupational groups were identified: healthcare workers for allergic dermatitis and chronic urticaria, and agricultural and construction workers for bronchial asthma. In patients with bronchial asthma exposed to allergens and irritants, direct correlations were found between substance P levels and both state ($r=0.649$; $p=0.0020$) and trait ($r=0.570$; $p=0.0087$) anxiety. Associations of several polymorphic variants of

genes involved in neuropeptide regulation, xenobiotic metabolism, and the immune response with respiratory and skin allergic pathologies were established. Based on the aggregated data, algorithms for the personalized monitoring of workers and the laboratory diagnosis of occupational allergic diseases were developed.

Study limitations. For several neuropeptide-related associations, statistical significance was not reached. The lack of prospective external validation currently precludes the use of the proposed markers as stand-alone tools for determining fitness for a particular occupation or establishing the work-relatedness of the disease.

Conclusion. A long-term research program substantiated the transition from the assessment of isolated exposure to a comprehensive risk-oriented model integrating occupational history, clinical and functional parameters, psycho-emotional status, neuropeptide markers, and molecular genetic markers.

Keywords: occupational allergic diseases, bronchial asthma, allergic dermatitis, neurogenic inflammation, substance P, vasointestinal peptide, risk, personalized prevention

Compliance with ethical standards. All patients were informed about the study. The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki (2013 revision), and its protocol was approved by the Local Biomedical Ethics Committee of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology.

Declaration of AI use. During the preparation of the manuscript, GigaChat-2 was used to check the spelling of the English-language text. All scientific interpretations, data analysis, and conclusions were made independently by the authors. The authors bear full responsibility for the content of the article.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Funding: the work was carried out within the framework of the Rospotrebnadzor sectoral research program for 2021–2025, item 2.1.9 (registration No. NIOKTR 121062100044-1); no additional sponsorship support was received.

For citation: Borisova A.I., Bakirov A.B., Abdrakhmanova E.R., Zaydullin I.I., Kabirova E.F., Galimova E.S., Galimova R.R., Distanova A.A., Rafikova L.I. Scientific rationale for the prevention of allergic diseases in individuals exposed to occupational allergens and irritants. Occupational health and human ecology. 2026; 3:88 -105.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10305>

For correspondence: Alla I. Borisova, e-mail: alla.borisova.ufa@gmail.com

Аллергические заболевания органов дыхания и кожи относятся к наиболее значимым хроническим состояниям у лиц трудоспособного возраста. Их рост сопровождается увеличением потребности в медицинской помощи, снижением качества жизни и трудоспособности.

В профессиональной среде к общепопуляционным факторам добавляется длительное воздействие веществ сенсibiliзирующего и раздражающего действия: аллергенов растительного, животного и микробного происхождения, металлов-сенсibiliзаторов, изоцианатов, формальдегида, ангидридов, эпоксидных и акрилатных соединений, производственных аэрозолей и многокомпонентных химических композиций [1-8].

Клинические проявления профессиональной аллергопатологии неоднородны. Даже при сходной экспозиции заболевание формируется не у всех работников, а тяжесть и скорость прогрессирования различаются. Это определяет необходимость изучения индивидуальной восприимчивости, включая особенности метаболизма ксенобиотиков, иммунного ответа, нейропептидной регуляции и состояния эпителиальных барьеров. Для бронхиальной астмы особенно значимо нейроиммунное воспаление, в котором сенсорные нейроны, нейропептиды, тучные клетки и клетки врожденного и адаптивного иммунитета формируют взаимно усиливающуюся воспалительную реакцию [9-13].

Отдельное значение имеет психоэмоциональная нагрузка. Тревога, хронический стресс, сменная и ночная работа способны изменять вегетативную регуляцию дыхательных путей и активность гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой оси. При сочетании с ингаляционной экспозицией эти механизмы могут поддерживать бронхиальную гиперреактивность, гиперсекрецию слизи и недостаточный контроль бронхиальной астмы [14]. Поэтому современная профилактика должна учитывать не только факт контакта с аллергеном, но и совокупный профиль риска конкретного работника.

В 2021-2025 гг. в рамках отраслевой научно-исследовательской программы Роспотребнадзора выполнен последовательный цикл исследований по оптимизации профилактики и реабилитации нарушений здоровья, связанных с воздействием аллергенов производственной среды и среды обитания. Работа включала переход от эпидемиологической характеристики и поиска наследственных факторов к оценке нейрогенного воспаления, прогнозированию

тяжелых форм заболеваний, выявлению предикторов аллергодерматозов и созданию персонифицированных алгоритмов наблюдения.

Цель исследования. Разработать и научно обосновать модель ранней диагностики и персонифицированной профилактики аллергических заболеваний у лиц трудоспособного возраста, подвергающихся воздействию производственных аллергенов и раздражителей.

Материалы и методы. Проведен интегративный анализ результатов последовательных этапов НИР. На первом этапе ретроспективно оценивали эпидемиологическую ситуацию по аллергическим заболеваниям в Республике Башкортостан за 2015-2019 гг., показатели качества жизни пациентов с бронхиальной астмой и наследственные факторы риска. Второй и третий этапы были направлены на изучение нейrogenного воспаления и молекулярно-генетических маркеров заболеваний органов дыхания. На четвертом этапе исследовали профессиональную структуру, микробиологические и генетические предикторы аллергических заболеваний кожи. Завершающий этап объединил клинические, функциональные, нейропептидные, генетические и психометрические данные и завершился разработкой алгоритмов персонифицированного наблюдения.

Клинико-функциональная часть включала пациентов, находившихся на стационарном лечении в отделении профессиональной пульмонологии, аллергологии и иммунологии ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека». На завершающем этапе проведено анкетирование 148 пациентов со среднетяжелой и тяжелой бронхиальной астмой: 57 мужчин и 91 женщины; средний возраст составил $54,9 \pm 8,9$ года. Отдельный комплексный анализ выполнен у 78 работников, контактировавших с аллергенами и раздражителями на рабочем месте, включая работников животноводческих и птицеводческих комплексов, медицинских организаций и предприятий пищевой промышленности, с бронхиальной астмой, аллергическим дерматитом или хронической крапивницей.

Психоземциональное состояние оценивали по опроснику Спилбергера-Ханина. Показатели реактивной и личностной тревожности классифицировали как низкие (до 30 баллов включительно), умеренные (31-45 баллов) и высокие (46 баллов и более). В сыворотке крови определяли концентрации субстанции Р и вазоинтестинального пептида (VIP) как маркеров нейропептидной регуляции. Результаты сопоставляли с тяжестью бронхиальной астмы, профессией, наличием

контакта с аллергенами и ирритантами, режимом работы и показателями тревожности.

Молекулярно-генетическое исследование включало 88 пациентов; контрольную группу составили 60 неродственных жителей Республики Башкортостан без признаков профессиональной аллергопатологии, сопоставимых по этнической принадлежности и полу. Генотипирование выполняли методом полимеразной цепной реакции в реальном времени с локус-специфичными праймерами и мечеными ДНК-зондами на амплификаторе Rotor-Gene Q (QIAGEN). Анализировали варианты генов, участвующих в нейропептидной регуляции, воспалительном ответе и метаболизме ксенобиотиков. Для локуса rs896 использовано корректное обозначение гена VIPR1, кодирующего рецептор VPAC1 для VIP [15].

Статистический анализ проводили в IBM SPSS Statistics 21 и Microsoft Excel. Частоты аллелей и генотипов сравнивали с применением критерия хи-квадрат с поправкой Йейтса, соответствие распределения равновесию Харди-Вайнберга контролировали расчетным методом. Ассоциации оценивали по отношению шансов (OR) и 95% доверительному интервалу; критический уровень значимости принимали равным 0,05. Для количественных показателей использовали среднее и стандартное отклонение; взаимосвязи оценивали корреляционным анализом.

Результаты и обсуждение

На первом этапе определены эпидемиологические и социально-клинические ориентиры. На втором - изучены нейрогенные механизмы и генетические маркеры хронических заболеваний органов дыхания. На третьем - сформирован набор предикторов неблагоприятного течения. На четвертом - расширен объект исследования за счет аллергодерматозов и на пятом - объединены профессиональные, клинические, психоэмоциональные, нейропептидные и генетические характеристики. Такая архитектура позволила завершить программу не только описанием факторов риска, но и прикладными алгоритмами профилактики.

Профессиональная структура аллергических заболеваний

Анализ профессиональной занятости показал различия профиля риска для заболеваний кожи и органов дыхания. Среди пациентов с аллергическим дерматитом, имевших контакт с аллергенами и ирритантами, на работников здравоохранения приходилось 40,0%, на сферу образования - 20,0%, еще по 10,0% - на пищевую промышленность, строительство, сельское хозяйство и клининг. При

хронической крапивнице доля работников здравоохранения составила 24,0%, нефтехимической промышленности - 16,0%, строительства - 12,0%. Полученные данные согласуются с ролью профессионального контакта с дезинфицирующими средствами, латексом, акрилатами, эпоксидными соединениями, изоцианатами, цементом и производственными аэрозолями [1-5, 7]. Среди работников здравоохранения медицинские сестры составляли 75,0% пациентов с аллергическим дерматитом и 66,7% пациентов с хронической крапивницей. В строительстве основной профессией риска были маляры - 66,7% соответствующей подгруппы. Бронхиальная астма чаще встречалась среди работников сельского хозяйства и строительства - по 17,1%, а также здравоохранения - 14,3%. Эти результаты подтверждают, что профилактические программы следует адресовать не только отрасли в целом, но и конкретным профессиональным группам с наиболее интенсивной химической или биологической экспозицией [6-8].

Средний стаж у контактировавших работников был выше, чем у лиц без профессионального контакта, однако различия не достигали статистической значимости. Следовательно, стаж сам по себе не может использоваться как достаточный критерий индивидуального риска. Его необходимо интерпретировать совместно с характером и интенсивностью экспозиции, клинической симптоматикой, функциональными показателями и индивидуальной восприимчивостью.

Молекулярно-генетические предикторы

В течение цикла исследований определен ряд кандидатных генетических маркеров, характеризующих различные звенья патогенеза: воспалительный ответ, нейропептидную регуляцию, метаболизм ксенобиотиков и иммунную реактивность. Наиболее выраженная ассоциация для хронического бронхита установлена для генотипа GG варианта TNF_BSP ($p=0,004$; $OR=22,305$). Генотип GG варианта GSTM exon 5 ассоциировался с профессиональным хроническим бронхитом ($p=0,017$; $OR=3,66$). Наблюдавшаяся для другого варианта тенденция к протективной ассоциации при $p=0,057$ не рассматривалась как статистически подтвержденная.

Для клинических признаков неблагоприятного течения бронхиальной астмы аллель G гена TAC1 был ассоциирован с ухудшением респираторных симптомов при физической нагрузке ($p=0,031$; $OR=1,22$), тогда как генотип AA - с меньшей вероятностью такого ухудшения ($p=0,030$; $OR=0,12$). Для rs3823082 гена VIP аллель

Т был связан с повышенной вероятностью аллергических реакций ($p=0,01$; $OR=2,34$), а аллель С - со сниженной вероятностью ($p=0,01$; $OR=0,43$).

На завершающем этапе генотип ТТ локуса rs896 гена VIPR1 выявлялся у работников с профессиональным контактом с аллергенами и ирритантами чаще, чем в контрольной группе ($p=0,011$; $OR=4,25$), и был связан с измененным профилем субстанции Р и VIP. Функциональная значимость rs896 подтверждается его локализацией в 3'-нетранслируемой области VIPR1 и влиянием аллельного варианта на регуляцию экспрессии VPAC1 микроРНК-525-5p [15]. Для аллергического дерматита установлены ассоциации с генотипом G/T rs890293 гена CYP2J2 ($p=0,032$; $OR=3,89$) и генотипом A/C rs1881457 гена IL4RA ($p=0,042$; $OR=2,05$) (Таб. 1).

Таблица 1. Статистически значимые молекулярно-генетические ассоциации, выявленные в ходе программы

Table 1. Statistically significant molecular-genetic associations identified during the program

Ген / вариант	Генотип или аллель	Ассоциированный признак	p, OR
TNF_BSP	GG	Хронический бронхит	$p=0,004$; $OR=22,305$
GSTM exon 5	GG	Профессиональный хронический бронхит	$p=0,017$; $OR=3,66$
VIPR1 rs896	TT	Бронхиальная астма	$p=0,011$; $OR=4,25$
CYP2J2 rs890293	G/T	Аллергический дерматит	$p=0,032$; $OR=3,89$
IL4RA rs1881457	A/C	Аллергический дерматит	$p=0,042$; $OR=2,05$

Полученные генетические ассоциации следует рассматривать как основу для выделения групп повышенного риска, а не как самостоятельный диагностический критерий. Для многофакторных заболеваний отдельный вариант не определяет неизбежность болезни. Клиническое применение требует подтверждения воспроизводимости результатов в независимых выборках, расчета прогностической точности комбинированной модели и обязательного медико-генетического консультирования.

Нейрогенное воспаление и психоэмоциональный статус

Анализ нейропептидного профиля подтвердил участие нейроиммунных механизмов в профессионально обусловленном течении бронхиальной астмы. Субстанция Р через рецептор NK1 способствует бронхоконстрикции, отеку слизистой оболочки, гиперсекреции и активации тучных клеток. VIP обладает преимущественно бронходилатирующими и иммуномодулирующими эффектами [9-13]. Их соотношение отражает баланс провоспалительных и компенсаторных механизмов, хотя его клинические пороговые значения требуют дополнительной валидации.

В группе пациентов с бронхиальной астмой, контактировавших с аллергенами и ирритантами на рабочем месте, выявлена прямая корреляция концентрации субстанции Р как с ситуативной тревожностью ($r=0,649$; $p=0,0020$), так и с личностной тревожностью ($r=0,570$; $p=0,0087$). В группе без профессионального контакта статистически значимых корреляций не обнаружено. Это различие поддерживает гипотезу о том, что рабочая среда может выступать модификатором взаимосвязи психоэмоционального напряжения и нейрогенного воспаления.

При прямом вопросе о наличии стресса положительно ответили 47,1% пациентов, тогда как стандартизированное тестирование выявило умеренную или высокую тревожность у 86,0%. Несоответствие самооценки и результатов опросника показывает ограниченность неспецифического вопроса о стрессе и обосновывает применение валидированных психометрических шкал. Среди работающих и неработающих пациентов распределение уровней личностной и ситуативной тревожности статистически значимо не различалось, что указывает на необходимость оценки индивидуального состояния независимо от формального статуса занятости.

В условиях ночной смены при переходе от низкого к умеренному уровню тревожности наблюдалось повышение субстанции Р и снижение VIP. При высоком

уровне тревожности для отдельных подгрупп отмечалось снижение нейропептидных показателей, интерпретируемое как возможное истощение регуляторного ответа. В дневную смену аналогичные зависимости были менее выраженными и более вариабельными. Поскольку часть межгрупповых различий не достигала статистической значимости, эти результаты следует считать поисковыми. Тем не менее они указывают на потенциальную роль сочетания тревожности, нарушения циркадных ритмов и производственной экспозиции в формировании неблагоприятного нейроиммунного профиля.

Совокупность полученных результатов позволяет представить патогенетическую модель в виде системы взаимосвязанных процессов. Профессиональные аллергены и irritants усиливают повреждение эпителиального барьера и сенсибилизацию, тревожность и ночная работа влияют на автономную и нейроэндокринную регуляцию, активация субстанции Р и дисбаланс VIP поддерживают воспаление, бронхоспазм и симптомы, что ведет к ухудшению контроля над симптомами заболевания, что само по себе в свою очередь повышает тревожность. Представленная модель объясняет ограниченную эффективность вмешательств, направленных только на одно звено патогенеза, и обосновывает необходимость комплексного сочетания экспозиционной, медицинской и психопрофилактической коррекции.

Персонализированная профилактика и практическая реализация

Итогом программы стала многоуровневая схема наблюдения работников, контактирующих с аллергенами и irritants. Первый уровень включает характеристику рабочего места, профессиональный и аллергологический анамнез, оценку респираторных и кожных симптомов. Второй уровень предусматривает клинико-функциональное обследование: спирометрию, оценку контроля бронхиальной астмы, осмотр аллерголога, дерматолога и профпатолога. Третий уровень дополняет обследование, направленное на выявление тревожности, определение маркеров нейrogenного воспаления молекулярно-генетическим тестированием.

При выявлении неблагоприятного индивидуального профиля работнику необходимо разъяснить вероятностный характер риска и возможные варианты снижения экспозиции. Решение о продолжении работы не может основываться только на результате генетического теста, оно должно приниматься с учетом клинического состояния, условий труда, эффективности средств индивидуальной и коллективной защиты, требований действующего законодательства и

заключения врачебной комиссии. Если контакт сохраняется, работника относят к группе усиленного динамического наблюдения с контролем симптомов и функции внешнего дыхания.

Для работников ночных смен целесообразно включать оценку тревожности в периодические медицинские осмотры, ограничивать последовательные ночные смены у лиц с признаками дезадаптации, обеспечивать достаточный восстановительный период и доступ к программам управления стрессом. Для профессиональных групп с кожной экспозицией приоритетны замена и герметизация раздражающих веществ, выбор средств защиты кожи, обучение безопасному использованию перчаток и дезинфицирующих средств, раннее направление к дерматологу и аллергологу.

Научные результаты трансформированы в прикладные продукты. Разработаны и утверждены методические рекомендации «Методы лабораторной специфической диагностики профессиональных аллергических заболеваний», создан промышленный образец «Алгоритм персонифицированного наблюдения работников, контактирующих с аллергенами и ирритантами» (патент на промышленный образец RU 149980 S от 10.11.2025).

Ограничения исследования

Для ряда нейропептидных зависимостей статистическая значимость не была достигнута. Отсутствие проспективной внешней валидации пока не позволяет использовать предложенные маркеры как самостоятельный инструмент допуска к профессии или установления связи заболевания с работой.

Заключение. Многолетний цикл исследований позволил последовательно перейти от характеристики эпидемиологической ситуации и профессиональных групп риска к изучению молекулярно-генетических и нейроиммунных механизмов, а затем к разработке прикладных профилактических решений. Наиболее уязвимыми по аллергодерматозам оказались работники здравоохранения, особенно медицинские сестры; по бронхиальной астме - работники сельского хозяйства, строительства и здравоохранения.

У пациентов с бронхиальной астмой, контактировавших с аллергенами и ирритантами, установлена связь субстанции Р с ситуативной и личностной тревожностью. Выявлены кандидатные генетические маркеры нейропептидной регуляции, воспалительного ответа, метаболизма ксенобиотиков и иммунной реактивности. Эти результаты обосновывают комплексную риск-

ориентированную модель, в которой профессиональный анамнез и характеристика экспозиции объединяются с клинико-функциональными, психометрическими, нейропептидными и молекулярно-генетическими данными.

Практическим результатом программы стали методические рекомендации, персонифицированные алгоритмы наблюдения и профилактики, патенты на промышленные образцы и зарегистрированная база данных. Разработанный подход может использоваться для совершенствования предварительных и периодических медицинских осмотров, раннего выделения групп повышенного риска и индивидуализации профилактических мероприятий при обязательном сохранении клинического приоритета и добровольности генетического тестирования.

Список литературы:

1. Красавина Е.К., Яцына И.В. Этиология и эпидемиология профессиональных и профессионально обусловленных заболеваний кожи на региональном уровне (по данным литературы). Медицина труда и экология человека. 2020;(4):56-62.
2. Измерова Н.И., Кузьмина Л.П., Чистова ИЯ, и др. Профессиональные заболевания кожи как социально-экономическая проблема. Медицина труда и промышленная экология. 2013;(7):28-33.
3. Карпова О.А., Филимонов С.Н., Колядо В.Б., и др. Заболевания кожи и подкожной клетчатки у работников железнодорожного транспорта: гигиенические аспекты. Медицина труда и промышленная экология. 2020;60(6):387-391.
4. Фасхутдинова А.А., Валеева Э.Т., Шагалина А.У., и др. Факторы риска и особенности развития профессиональных заболеваний кожи у работающих Республики Башкортостан. Медицина труда и экология человека. 2018;(1):57-64.
5. Holness DL. Occupational dermatitis and urticaria. Immunol Allergy Clin North Am. 2021;41(3):439-453. doi: 10.1016/j.iac.2021.04.006.
6. Масыгутова Л.М., Абдрахманова Е.Р., Бакиров А.Б., Габдулвалеева Э.Ф. Основные подходы к диагностике профессиональных аллергических заболеваний в современных условиях. Социальные аспекты здоровья населения. 2022;68(4):14. doi: 10.21045/2071-5021-2022-68-4-14.
7. Рослая Н.А., Ножкина Н.В., Бушуева Т.В. Алгоритм формирования групп риска и ранней диагностики профессиональной аллергопатологии у медицинских работников. Медицина труда и промышленная экология. 2017;(9):163.
8. Масыгутова Л.М., Гизатуллина Л.Г., Волгарева А.Д., Бакиров А.Б., Шагалина А.У. Распространенность заболеваний аллергической этиологии у работников

животноводческого комплекса. Медицина труда и экология человека. 2018;(3):52-58.

9. Pavon-Romero GF, Serrano-Perez NH, Garcia-Sanchez L, Ramirez-Jimenez F, Teran LM. Neuroimmune pathophysiology in asthma. *Front Cell Dev Biol.* 2021;9:663535. doi: 10.3389/fcell.2021.663535.

10. Кучер А.Н. Нейрогенное воспаление: биохимические маркеры, генетический контроль и болезни. Бюллетень сибирской медицины. 2020;19(2):171-181. doi: 10.20538/1682-0363-2020-2-171-181.

11. Wang N., Wang J., Zhang Y., et al. Substance P-induced lung inflammation in mice is mast cell dependent. *Clin Exp Allergy.* 2022;52(1):46-58. doi: 10.1111/cea.13902.

12. Thapaliya M, Chompunud Na Ayudhya C, Amponnawarat A, Roy S, Ali H. Mast cell-specific MRGPRX2: a key modulator of neuro-immune interaction in allergic diseases. *Curr Allergy Asthma Rep.* 2021;21(1):3. doi: 10.1007/s11882-020-00979-5.

13. Blake KJ, Jiang XR, Chiu IM. Neuronal regulation of immunity in the skin and lungs. *Trends Neurosci.* 2019;42(8):537-551. doi: 10.1016/j.tins.2019.05.005.

14. Боговин Л.В., Отраднова А.А., Монахова В.В., Шабанова А.С. Влияние тревожно-депрессивных расстройств на течение бронхиальной астмы. Бюллетень физиологии и патологии дыхания. 2014;(52):29-33.

15. Paladini F, Porciello N, Camilli G, et al. Single nucleotide polymorphisms in the 3'-UTR of VPAC-1 cooperate in modulating gene expression and impact differently on the interaction with miR525-5p. *PLoS One.* 2014;9(11):e112646. doi: 10.1371/journal.pone.0112646.

References:

1. Krasavina E.K., Yatsyna I.V. Etiology and epidemiology of occupational and work-related skin diseases at the regional level: a literature review. *Meditina truda i ekologiya cheloveka.* 2020;(4):56-62. (In Russ.)

2. Izmerova N.I., Kuzmina L.P., Chistova IYa, et al. Occupational skin diseases as a socio-economic problem. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology.* 2013;(7):28-33. (In Russ.)

3. Karpova O.A., Filimonov S.N., Kolyado V.B., et al. Diseases of the skin and subcutaneous tissue in railway workers: hygienic aspects. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology.* 2020;60(6):387-391. (In Russ.)

4. Faskhutdinova AA, Valeeva ET, Shagalina AU, et al. Risk factors and features of occupational skin diseases among workers in the Republic of Bashkortostan. *Meditina truda i ekologiya cheloveka.* 2018;(1):57-64. (In Russ.)

5. Holness DL. Occupational dermatitis and urticaria. *Immunol Allergy Clin North Am*. 2021;41(3):439-453. doi: 10.1016/j.iac.2021.04.006.
6. Masyagutova LM, Abdrakhmanova ER, Bakirov AB, Gabdulvaleeva EF. Main approaches to the diagnosis of occupational allergic diseases in modern conditions. *Sotsialnye aspekty zdorovya naseleniya*. 2022;68(4):14. doi: 10.21045/2071-5021-2022-68-4-14. (In Russ.)
7. Roslaia NA, Nozhkina NV, Bushueva TV. Algorithm for forming risk groups and early diagnosis of occupational allergopathology in healthcare workers. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2017;(9):163. (In Russ.)
8. Masyagutova LM, Gizatullina LG, Volgareva AD, Bakirov AB, Shagalina AU. Prevalence of allergic diseases among livestock complex workers. *Meditina truda i ekologiya cheloveka*. 2018;(3):52-58. (In Russ.)
9. Pavon-Romero GF, Serrano-Perez NH, Garcia-Sanchez L, Ramirez-Jimenez F, Teran LM. Neuroimmune pathophysiology in asthma. *Front Cell Dev Biol*. 2021;9:663535. doi: 10.3389/fcell.2021.663535.
10. Kucher AN. Neurogenic inflammation: biochemical markers, genetic control and diseases. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2020;19(2):171-181. doi: 10.20538/1682-0363-2020-2-171-181. (In Russ.)
11. Wang N, Wang J, Zhang Y, et al. Substance P-induced lung inflammation in mice is mast cell dependent. *Clin Exp Allergy*. 2022;52(1):46-58. doi: 10.1111/cea.13902.
12. Thapaliya M, Chompunud Na Ayudhya C, Amponnawarat A, Roy S, Ali H. Mast cell-specific MRGPRX2: a key modulator of neuro-immune interaction in allergic diseases. *Curr Allergy Asthma Rep*. 2021;21(1):3. doi: 10.1007/s11882-020-00979-5.
13. Blake KJ, Jiang XR, Chiu IM. Neuronal regulation of immunity in the skin and lungs. *Trends Neurosci*. 2019;42(8):537-551. doi: 10.1016/j.tins.2019.05.005.
14. Bogovin LV, Otradnova AA, Monakhova VV, Shabanova AS. Influence of anxiety and depressive disorders on the course of bronchial asthma. *Byulleten fiziologii i patologii dykhaniya*. 2014;(52):29-33. (In Russ.)
15. Paladini F, Porciello N, Camilli G, et al. Single nucleotide polymorphisms in the 3'-UTR of VPAC-1 cooperate in modulating gene expression and impact differently on the interaction with miR525-5p. *PLoS One*. 2014;9(11):e112646. doi: 10.1371/journal.pone.0112646.

Информация об авторах

Борисова Алла Ивановна - кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник отдела медицины труда ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и

экологии человека», e-mail: alla.borisova.ufa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8618-8005>; 8-919-153-28-96.

Бакиров Ахат Бариевич - доктор медицинских наук, профессор, советник директора ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», заведующий кафедрой терапии и профессиональных болезней ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России, e-mail: akhatb@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3510-2595>.

Абдрахманова Елена Рафиловна - кандидат медицинских наук, заместитель директора по научной и организационно-методической работе ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», доцент кафедры терапии и профессиональных болезней ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России, e-mail: elenara@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2763-1358>.

Зайдуллин Искандер Илдарович – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом медицины труда ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail: iskanderdent@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-6031-5683>.

Кабилова Эльвира Филаретовна - заведующая отделением профессиональной аллергологии и иммунореабилитации ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail: idehlvira@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6992-096X>.

Галимова Елена Станиславовна – доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры пропедевтики внутренних болезней ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России e-mail: lenagalimova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3788-2284>.

Галимова Расима Расиховна – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник отдела медицины труда ФБУН Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека, доцент кафедры терапии и профессиональных болезней ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России; e-mail: rasima75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4658-545X>

Дистанова Альбина Анваровна - врач-аллерголог-иммунолог отделения профессиональной пульмонологии, аллергологии и иммунологии ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail: d.albina.a@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4249-2288>.

Рафикова Лианна Ильясовна - врач - пульмонолог отделения профессиональной пульмонологии и иммунологии ФБУН "Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека", e-mail: rafikova.lianna@yandex.ru.

Author information

Borisova Alla Ivanovna - Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, Department of Occupational Medicine, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail: alla.borisova.ufa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8618-8005>; 8-919-153-28-96.

Bakirov Akhat Barievich - Doctor of Medical Sciences, Professor, Advisor to the Director, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Head of the Department, Department of Therapy and Occupational Diseases with the Course of Additional Professional Education, Bashkir State Medical University, e-mail: akhatb@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3510-2595>.

Abdrakhmanova Elena Rafilovna - Candidate of Medical Sciences, Deputy Director for Scientific, Organizational and Methodological Work, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Associate Professor, Department of Therapy and Occupational Diseases, Bashkir State Medical University, e-mail: elenara@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2763-1358>.

Zaidullin Iskander Ildarovich - Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of Occupational Medicine, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail: iskanderdent@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-6031-5683>.

Kabirova Elvira Filaretovna - Head of the Department of Occupational Allergology and Immunorehabilitation, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail: idehlvira@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6992-096X>.

Galimova Elena Stanislavovna - Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Propaedeutics of Internal Diseases, Bashkir State Medical University, e-mail: lenagalimova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3788-2284>.

Galimova Rasima Rasikhovna - Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, Department of Occupational Medicine, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Associate Professor, Department of Therapy and Occupational

Diseases, Bashkir State Medical University of the Ministry of Health of Russia, e-mail: rasima75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4658-545X>.

Distanova Albina Anvarovna - Allergist-Immunologist, Department of Occupational Pulmonology, Allergology and Immunology, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail: d.albina.a@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4249-2288>.

Rafikova Lianna Ilyasovna - Pulmonologist, Department of Occupational Pulmonology and Immunology, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail: rafikova.lianna@yandex.ru.

Поступила/Received: 28.08.2026

Принята в печать/Accepted: 03.09.2026

УДК 613.6:575

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОЛИМОРФИЗМОВ ГЕНА *CPOX* С УРОВНЕМ КОПРОПОРФИРИНА И ЭРИТРОПОЭЗА У РАБОТНИКОВ ПРОИЗВОДСТВА СВИНЦА ИЗ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

Шаихова Д.Р.¹, Кикоть А.М.¹, Берёза И.А.¹, Полянина Д.Д.¹, Боковой В.Д.^{1,2},
Сутункова М.П.^{1,2}

¹ФБУН «Екатеринбургский медицинский - научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора, Екатеринбург, Россия

²ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России, Екатеринбург, Россия

Свинец остаётся значимым фактором профессионального риска. Полиморфизмы в генах, участвующих в токсикокинетике свинца, в антиоксидантной защите и регуляции сосудистого тонуса могут модифицировать накопление металла и окислительный стресс, а гены порфиринового пути рассматриваются как ключевое звено. Копропорфириногеноксидаза (*CPOX*) чувствительна к действию тяжёлых металлов, а её полиморфизмы (*CPOX4* и *CPOX5*) ранее связывали с изменениями профиля порфиринов и чувствительности к ртути, однако вклад вариаций *CPOX* в индивидуальную восприимчивость к токсическому действию свинца практически не изучен.

Цель исследования – исследовать ассоциации полиморфизмов *CPOX* (rs1131857, rs1729995) с уровнем копропорфирина, гемоглобина и числом эритроцитов у работников производства свинца из вторичного сырья.

Материалы и методы. Были обследованы стажированные мужчины, работающие на предприятии по производству свинца из вторичного сырья. В основную группу вошли работники металлургического цеха (110 человек), в группу сравнения вошли мужчины (122 человека), работающие на этом же предприятии и не имеющие контакта с вредными факторами производства. ДНК выделяли из периферической крови солевым методом, определение полиморфизма было проведено с помощью ПЦР в реальном времени. Для оценки полученных данных использовался критерий Манна-Уитни в пакете программ Statistica 12.

Результаты. В результате проведённого исследования было установлено, что уровень копропорфирина в моче у работников основной группы был в 1,57 раза выше, чем у работников из группы сравнения. При рассмотрении показателей

системы крови относительно полиморфизмов гена *CPOX* в группе сравнения не было обнаружено статистически значимых различий, однако в основной группе уровень гемоглобина был статистически ниже у носителей мутантного гомозиготного и гетерозиготного вариантов *CPOX5*. Снижение уровня гемоглобина у носителей мутантного аллеля в условиях вредного производства может свидетельствовать о нарушении синтеза гема.

Ограничения исследования. В данном исследовании не определялась этническая принадлежность и не определялись уровни свинца в крови как биомаркер экспозиции.

Заключение. Впервые выявленная связь между мутантным аллелем *CPOX5* и снижением уровня гемоглобина указывает на то, что данный полиморфизм может снижать эффективность синтеза гема в условиях действия вредных факторов производства свинца из вторичного сырья.

Полученные результаты расширяют понимание влияния полиморфизма *CPOX5* на активность ферментативных систем, которые ранее считались малоизученными или неактивными в подобных условиях.

Ключевые слова: полиморфизм генов, свинец, биомаркеры, профессиональный риск, гемоглобин, копропорфирин, *CPOX*, генетическая предрасположенность

Соблюдение этических стандартов: этическое одобрение исследования было получено от локального этического комитета Федерального бюджетного учреждения науки «Екатеринбургский медицинский - научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промышленных предприятий» Роспотребнадзора (протокол № 1 от 26.02.2021). Работа выполнялась в соответствии с этическими нормами Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (редакция 2013 г.).

Использование инструментов искусственного интеллекта: авторы заявляют, что при подготовке настоящей рукописи системы искусственного интеллекта не применялись.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Шаихова Д.Р., Кикоть А.М., Берёза И.А., Полянина Д.Д., Боковой В.Д., Сутункова М.П. Взаимосвязь полиморфизмов гена *CPOX* с уровнем

копропорфирина и эритропоеза у работников производства свинца из вторичного сырья. Медицина труда и экология человека, 2026; 3:106-123.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10306>

Для корреспонденции: Дарья Рамильевна Шаихова, e-mail: darya.booo@mail.ru

RELATIONSHIP BETWEEN *CPOX* GENE POLYMORPHISMS AND INDICATORS OF COPROPORPHYRIN LEVELS AND ERYTHROPOIESIS IN WORKERS ENGAGED IN SECONDARY LEAD SMELTING

Shaikhova D.R.¹, Kikot A.M.¹, Bereza I.A.¹, Polianina D.D.¹, Bokovoy V.D.^{1,2}, Sutunkova M.P.^{1,2}

¹Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, Russian Federation

²Ural State Medical University, Yekaterinburg, Russian Federation

Lead remains a significant occupational hazard. Polymorphisms in genes involved in lead toxicokinetics antioxidant defense, and vascular tone regulation can modify metal accumulation and oxidative stress, with genes in the porphyrin pathway considered a key link. Coproporphyrinogen-III oxidase (*CPOX*) is sensitive to effects of heavy metals, while its polymorphisms (*CPOX4* and *CPOX5*) have previously been linked to changes in porphyrin profiles and mercury sensitivity. However, the contribution of *CPOX* variants to individual susceptibility to lead toxicity remains largely unstudied.

The purpose of the study was to investigate the associations between *CPOX* polymorphisms (rs1131857, rs1729995) and coproporphyrin levels, hemoglobin, and red blood cell counts in workers producing lead from secondary raw materials.

Materials and methods. Experienced male workers employed at a lead production facility using recycled raw materials were examined. The main group included 110 workers from the metallurgical shop, while the reference group included 122 men working at the same facility but not occupationally exposed to lead-related production hazards. DNA was isolated from peripheral blood using the salting-out method, and polymorphisms were determined using real-time PCR. The Mann-Whitney test in Statistica 12 was used to evaluate the obtained data.

Results. We established that urinary coproporphyrin levels in the exposed workers were 1.57 times higher than those in the controls. When examining blood parameters in terms of *CPOX* gene polymorphisms in the reference group, no statistically significant differences were found but in the main group, hemoglobin levels were statistically lower in carriers of the homozygous and carriers of the AG or AA genotypes of *CPOX5*. A decrease in hemoglobin levels in carriers of the mutant allele in hazardous production conditions may suggest a possible impairment of heme synthesis.

Study limitations. Neither ethnicity nor blood lead levels as biomarkers of exposure were determined in the study.

Conclusions. The newly identified association between the mutant *CPOX5* allele and decreased hemoglobin levels suggests that this polymorphism may reduce the efficiency of heme synthesis following the exposure to occupational hazards of secondary lead smelting. The findings contribute to understanding the role of *CPOX5* polymorphism, which remains poorly characterized under conditions of occupational lead exposure.

Keywords: gene polymorphism, lead, biomarkers, occupational risk, hemoglobin, coproporphyrin, *CPOX*, genetic predisposition

Compliance with ethical standards: Ethics approval was provided by the Local Ethics Committee of the Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (protocol No. 1 of February 26, 2021). The study was conducted in accordance with the ethical principles of the World Medical Association Declaration of Helsinki (2013).

Declaration of AI use: The authors declare that no artificial intelligence tools were used in the preparation of this manuscript.

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

Funding: The study did not have sponsorship.

For citation: Shaikhova D.R., Kikot A.M., Bereza I.A., Polianina D.D., Bokovoy V.D., Sutunkova M.P. Relationship between *CPOX* gene polymorphisms and indicators of porphyrin metabolism and erythropoiesis in workers engaged in secondary lead smelting. *Occupational Health and Human Ecology*.2026; 3:106-123.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10306>

For correspondence: Daria R. Shaikhova, e-mail: darya.booo@mail.ru

Тяжёлые металлы, и прежде всего свинец (Pb), остаются значимым фактором профессионального риска, несмотря на снижение его использования в ряде отраслей. Даже низкие уровни хронического воздействия свинца ассоциируются с нарушениями нервной системы, сердечно-сосудистыми и почечными заболеваниями, а также с генотоксическими эффектами, при этом безопасного порогового уровня экспозиции не установлено [1-6].

При сходных дозах воздействия у разных людей наблюдается выраженная вариабельность клинических проявлений, что может объясняться влиянием генетических и эпигенетических детерминант токсикокинетики и токсикодинамики свинца [1, 7-10].

Гены порфиринового пути рассматриваются как ключевое звено, поскольку свинец ингибирует несколько ферментов биосинтеза гема и вызывает характерные порфиринурии, используемые в биомониторинге [11]. Копропорфириногеноксидаза (CPOX), шестой фермент пути, чувствительна к действию тяжёлых металлов, а её полиморфизмы (в частности *CPOX 4* и *CPOX 5*) ранее связывали с изменениями профиля порфиринов и чувствительности к ртути [11].

Тем не менее, вклад вариаций *CPOX* в индивидуальную восприимчивость к токсическому действию свинца практически не изучен, в то время как основное внимание уделялось *ALAD* и другим генам [1-2, 12-14].

С учётом центральной роли *CPOX* в синтезе гема, потенциальной металлочувствительности фермента и важности поиска ранних генетических маркёров уязвимости к свинцу, исследование ассоциации полиморфизмов *CPOX* с биомаркерами эффекта свинца в условиях профессионального воздействия является актуальной задачей.

Такое исследование может углубить понимание механизмов взаимодействия ген-среда и помочь в формировании персонализированных стратегий профилактики для групп повышенного риска.

Цель работы – исследовать ассоциации полиморфизмов *CPOX* (rs1131857, rs1729995) с уровнем копропорфирина, гемоглобина и числом эритроцитов у работников производства свинца из вторичного сырья.

Материалы и методы. Были обследованы стажированные мужчины, работающие на предприятии по производству свинца из вторичного сырья. В основную группу

вошли работники металлургического цеха (110 человек): плавильщики отделения рафинирования, плавильщики, сушильщики и шихтовщики отделения черного свинца (средний возраст $39,01 \pm 8,91$ года. В группу сравнения вошли мужчины (122 человека), работающие на этом же предприятии (средний возраст $44,06 \pm 9,73$) и не имеющие контакта с вредными факторами производства. Выборка была сопоставима по возрасту. Вредные производственные факторы были определены по материалам СОУТ и КИ, описаны ранее [15]. Кратко, уровни максимально разовых/ среднесменных концентраций химических веществ определены по результатам: отделение рафинирования – 0,113-2,4221 мг/м³, отделение черного свинца – 0,495 мг/м³. В исследование включали работников на основании следующих критериев:

- информированное письменное согласие на клинико-лабораторное обследование;
- мужской пол;
- общий стаж работы более 5 лет;
- отсутствие профессиональных заболеваний;
- отсутствие обострения хронических заболеваний.

Данные по уровням копропорфирина и гемоглобина, количеству эритроцитов в крови были взяты из карт периодического медицинского осмотра (ПМО), который проводится на базе Центра.

Определение полиморфизмов гена CPOX (CPOX4 - rs1131857, CPOX5 - rs1729995).

Выделение ДНК из образцов цельной крови проводили солевым методом по стандартной методике. Концентрацию и чистоту выделенной ДНК определяли с использованием спектрофотометра NanoDrop-ONE (Thermo Fisher Scientific, США). Амплификацию проводили в режиме реального времени с зондами и праймерами, представленными в Таблице 1.

Таблица 1. Последовательность праймеров и зондов [11]

Table 1. Sequence of primers and probes [11]

Ген / Gene	Направление / Direction	Последовательность / Sequence 5' → 3'
Homo sapiens		
<i>CPOX4 - rs1131857</i>	Прямой / Direct	CCAGTAATGCTGAATCTCAAAAGTCC
	Обратный / Reverse	GGACAGCGTCTTCTTGATTCAAGTAT
	Зонд (аллель A) / Probe (allele A)	ACCACTGCTTGTTGCCTACCAAATCA
	Зонд (аллель C) / Probe (allele C)	ACCACTGCTTGTTGGCCTACCAAATC
<i>CPOX5 - rs1729995</i>	Прямой / Direct	GCTGTGTTTTCCAGGTGTGATGA
	Обратный / Reverse	GGAATGTAAGAAGGAAGTACAGCCCT
	Зонд (аллель A) / Probe (allele A)	CCCCGCCGTTCTCCACGAT
	Зонд (аллель G) / Probe (allele G)	CCCCGCCGCTCTCCACG

После обработки первичных данных, для каждого образца был присвоен один из генотипов: CPOX4 – rs1131857: A/A – нормальный гомозиготный вариант; A/C; C/C – гетерозиготный и мутантный гомозиготный вариант; CPOX5 – rs1729995: G/G – нормальный гомозиготный вариант; A/G; A/A – гетерозиготный и мутантный гомозиготный вариант. В исследовании использовалась доминантная модель: нормальный гомозиготный вариант против гетерозиготного и мутантного

гомозиготного варианта для сохранения статистической мощности при низкой частоте минорного аллеля.

Статистический анализ

Нормальность распределения выборочных данных проверяли с применением критерия Колмогорова–Смирнова. Для статистической обработки экспериментальных данных использовали непараметрический U-критерий Манна–Уитни для сравнения двух независимых групп в программе Statistica (StatSoft). Результаты считали достоверными при $p < 0,05$.

Результаты

В результате проведённого исследования было установлено, что уровень копропорфирина в моче у работников основной группы был в 1,57 раз выше (Рисунок 1), чем у работников из группы сравнения ($p=0,015$).

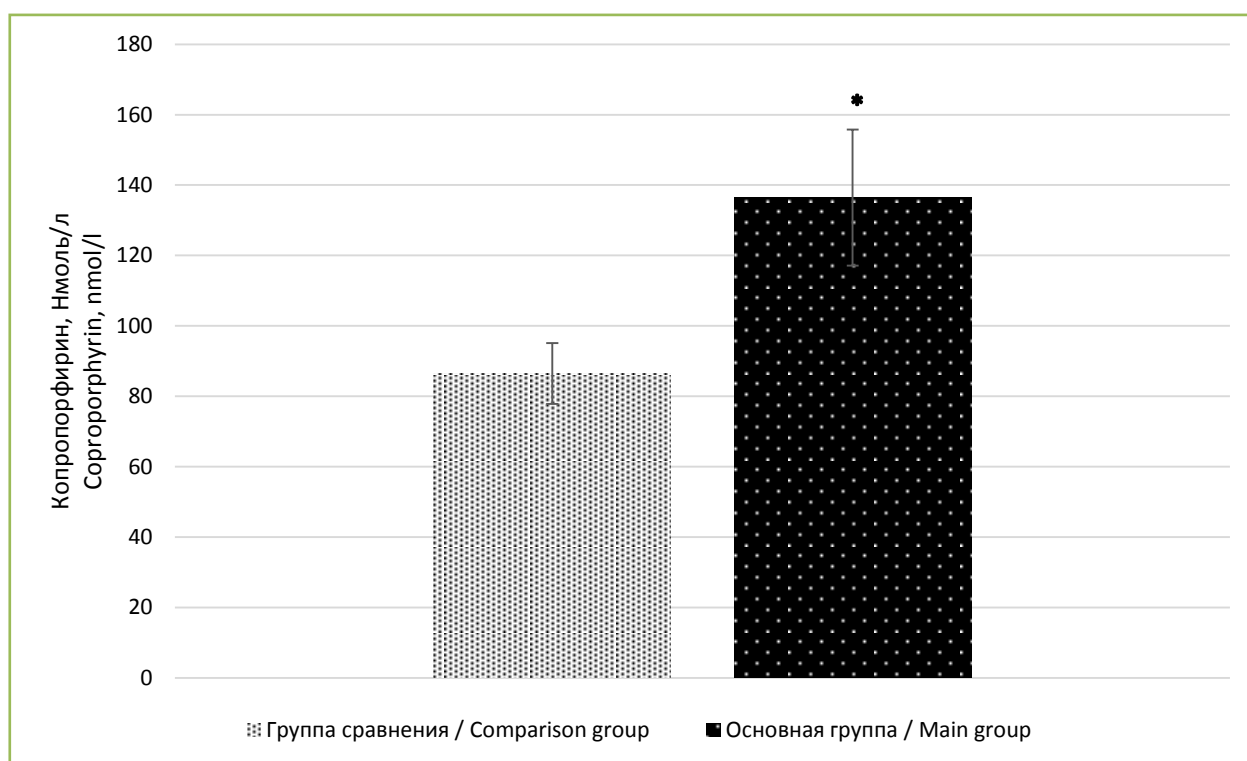


Рисунок 1. Уровень копропорфирина в моче у работников группы сравнения и основной группы. * обозначены статистически значимые различия ($p=0,015$)

Figure 1. Urinary coproporphyrin levels in the control group and the study group. * indicates statistically significant differences ($p=0.015$)

При рассмотрении показателей системы крови относительно полиморфизмов гена *CPOX* в группе сравнения не было обнаружено статистически значимых различий (Таблица 2).

Однако в основной группе уровень гемоглобина был статистически ниже у носителей мутантного гомозиготного генотипа АА и гетерозиготного вариантов генотипа АG гена *CPOX* по полиморфизму *CPOX5* ($p=0,012$) (Рисунок 2). А также тенденция к более высокому уровню копропорфирина ($p=0,012$) у носителей мутантного гомозиготного генотипа СС и гетерозиготного вариантов АС по полиморфизму *CPOX4* ($160,71 \pm 43,92$) в сравнении со значением ($121,96 \pm 16,45$) у носителей гомозиготного генотипа АА, однако не достигла статистической значимости ($p=0,316$).

Таблица 2. Значения показателей у работников основной группы и группы сравнения в зависимости от полиморфизмов *CPOX4* и *CPOX5*

Table 2. Parameter values in the main and comparison groups depending on *CPOX4* and *CPOX5* polymorphisms

Полиморфизм Polymorphism	Копропорфин, Нмоль/л Coprotophyrin, nmol/L	Эритроциты, $10^{12}/л$ Red blood cells (RBC), $10^{12}/L$	Гемоглобин, г/л Hemoglobin, g/L
Группа сравнения / Comparison group			
<i>CPOX4</i> AA (n=86)	$82,51 \pm 9,22$	$4,49 \pm 0,04$	$141,22 \pm 1,07$
<i>CPOX4</i> AC+CC (n=37)	$95,75 \pm 19,44$	$4,48 \pm 0,05$	$143,92 \pm 1,56$
<i>p</i>	0,741	0,655	0,103
<i>CPOX5</i> GG (n=57)	$88,94 \pm 13,56$	$4,47 \pm 0,05$	$142,14 \pm 1,15$
<i>CPOX5</i> AG+AA (n=66)	$84,38 \pm 11,22$	$4,50 \pm 0,04$	$141,94 \pm 1,33$
<i>p</i>	0,690	0,338	0,612
Основная группа / Main group			

<i>CPOX4</i> AA (n=69)	121,96±16,45	4,48±0,04	141,81±1,04
<i>CPOX4</i> AC+CC (n=41)	160,71±43,92	4,43±0,05	140,195±1,71
<i>p</i>	0,316	0,565	0,699
<i>CPOX5</i> GG (n=52)	147,85±30,91	4,53±0,04	143,52±1,35
<i>CPOX5</i> AG+AA (n=58)	123,65±22,19	4,40±0,04	138,63±1,12
<i>p</i>	0,270	0,069	0,012

Примечания: в таблице указаны среднее ± ошибка среднего, жирным выделены статистически значимые отличия

Note: data are presented as mean ± standard error of the mean; statistically significant differences are shown in bold.

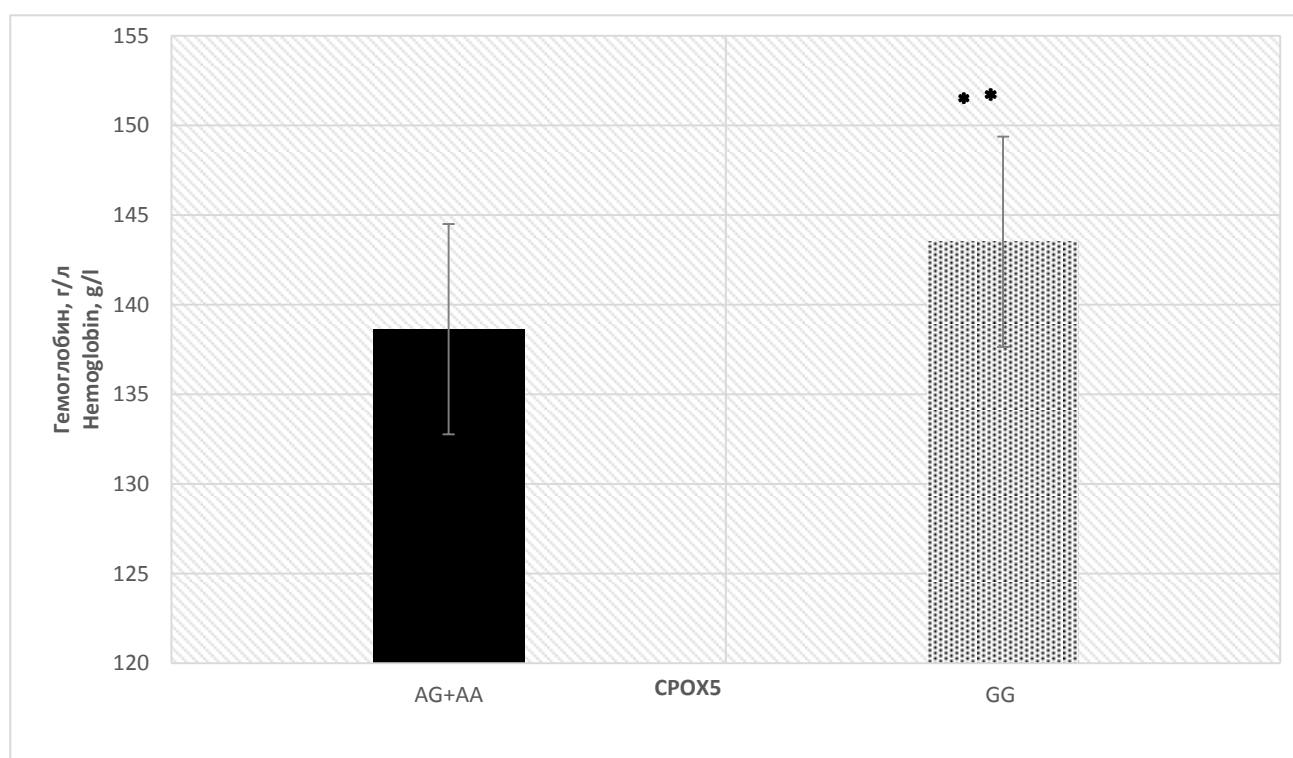


Рисунок 2. Уровень гемоглобина у работников основной группы в зависимости от генотипа *CPOX5*. * обозначены статистически значимые различия ($p=0,012$)

Figure 2. Hemoglobin levels in the study group depending on the *CPOX5* genotype. * indicates statistically significant differences ($p=0.012$)

Обсуждение

CPOX – шестой фермент пути синтеза гема, локализован в межмембранном пространстве митохондрий и участвует в превращении копропорфириногена в протопорфириноген. Ранее Taketani с соавторами было показано, что увеличение активности CPOX усиливает эритроидную дифференцировку и синтез гемоглобина, а снижение активности уменьшает синтез гема и гемоглобина [16].

CPOX4 (rs1131857) и *CPOX5* (rs1729995) – два полиморфизма гена *CPOX*, которые по-разному влияют на чувствительность к токсикантам, но не связаны с тяжёлыми классическими порфириями. Ранее было показано, что у людей с *CPOX4* меняется профиль выведения порфиринов с мочой при воздействии ртути, а рекомбинантный фермент CPOX имеет более низкое сродство к субстрату и работает менее эффективно [17-19]. Однако в нашем исследовании не было выявлено влияния данного полиморфизма на систему крови, хотя была тенденция к более высокому уровню копропорфирина в моче у работников, находящихся под воздействием вредных производственных факторов.

На данный момент имеется ограниченное количество исследований, посвящённых полиморфизму *CPOX5* (rs1729995), а влияние *CPOX5* на активность фермента и последующие эффекты пока неизвестны [17]. В исследовании Woods с соавторами ни у мальчиков, ни у девочек с генотипом *CPOX5* не наблюдалось никакой реакции ни на острое, ни на хроническое воздействие ртути [20]. В нашем исследовании впервые было показано, что у носителей мутантного аллеля при воздействии вредных факторов производства свинца из вторичного сырья уровень гемоглобина ниже по сравнению с носителями нормального гомозиготного генотипа.

Снижение уровня гемоглобина у носителей мутантного аллеля в условиях вредного производства могут свидетельствовать о нарушении синтеза гема. Полученные результаты расширяют понимание влияния полиморфизма *CPOX5* на активность ферментативных систем, которые ранее считались малоизученными или неактивными в подобных условиях.

Заключение

Впервые выявленная ассоциация между мутантным аллелем *CPOX5* и снижением уровня гемоглобина указывает на то, что данный полиморфизм может снижать

эффективность синтеза гема в условиях действия вредных факторов производства свинца из вторичного сырья. Дальнейшие исследования, посвященные изучению механизмов развития анемических состояний у мутантного аллеля *CPOX5*, помогут обосновать необходимость включения данного генетического маркера в программы мониторинга здоровья работников вредных производств и формировать группы повышенного риска.

Вклад авторов:

Концепция и дизайн исследования – Шаихова Д.Р., Кикоть А.М., Берёза И.А., Сутункова М.П.

Сбор и обработка материала – Полянина Д.Д., Берёза И.А., Кикоть А.М., Шаихова Д.Р., Боковой В.Д.

Анализ данных – Шаихова Д.Р.

Написание текста и оформление статьи – Шаихова Д.Р.

Редактирование – Полянина Д.Д., Берёза И.А., Кикоть А.М., Шаихова Д.Р., Боковой В.Д., Сутункова М.П.

Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех ее частей.

Author contribution:

Concept and design of the study – Shaikhova D.R., Kikot A.M., Bereza I.A., Sutunkova M.P.

Data collection and processing – Polianina D.D., Bereza I.A., Kikot A.M., Shaikhova D.R., Bokovoy V.D.

Data analysis – Shaikhova D.R.

Writing the text and designing the article – Shaikhova D.R.

Editing – Polianina D.D., Bereza I.A., Kikot A.M., Shaikhova D.R., Bokovoy V.D., Sutunkova M.P.

All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Список литературы:

1. Cuomo D., Foster M., Threadgill D. Systemic review of genetic and epigenetic factors underlying differential toxicity to environmental lead (Pb) exposure. *Environmental Science and Pollution Research* 2022; 29: 35583–35598.
2. García-Léston J., Roma-Torres J., Vilares M., Pinto R., Prista J., Teixeira J., et al. Genotoxic effects of occupational exposure to lead and influence of polymorphisms in genes involved in lead toxicokinetics and in DNA repair. *Environment international* 2012; 43: 29–36.
3. Yang P., Ji T., Yang Z., Song J., Liu H. Haixia Fan Relationship between lead exposure and different types of hypertension: systematic review and dose–response meta-analysis. *Front Public Health*. 2025; 10; 13:1706805.
4. Howard J.A., David L., Lux F., Tillement O. Low-level, chronic ingestion of lead and cadmium: The unspoken danger for at-risk populations. *J Hazard Mater*. 2024; 478: 135361.
5. Rocha A., Trujillo K.A. Neurotoxicity of low-level lead exposure: History, mechanisms of action, and behavioral effects in humans and preclinical models. *Neurotoxicology*. 2019; 73: 58–80.
6. Wang X., Liang H., Wang Y., Cai C., Li J., Li X. et al. Risk factors of renal dysfunction and their interaction in level-low lead exposure paint workers. *BMC Public Health*. 2018; 18(1): 526.
7. Ding N., Wang X., Weisskopf M., Sparrow D., Schwartz J., Hu H., et al. Lead-Related Genetic Loci, Cumulative Lead Exposure and Incident Coronary Heart Disease: The Normative Aging Study. *PLoS ONE* 2016 Sep 1; 11(9): e0161472.
8. Mani M.S., Kabekkodu S.P., Joshi M.B., Dsouza H.S. Ecogenetics of lead toxicity and its influence on risk assessment. *Hum Exp Toxicol*. 2019; 38(9): 1031–1059.
9. Stajniko A., Palir N., Snoj T.J., Mazej D., Sešek Briški A., Runkel A.A. et al. Genetic susceptibility to low-level lead exposure in men: Insights from ALAD polymorphisms. *Int J Hyg Environ Health*. 2024; 256: 114315.
10. Wang K., Meng Y., Wang T., Tu Y., Gong S., Zhang G. et al. Global and gene-specific promoter methylation, and micronuclei induction in lead-exposed workers: A cross-sectional study. *Environ Mol Mutagen*. 2021; 62(7): 428–434.
11. Woods J.S., Echeverria D., Heyer N.J., Simmonds P.L., Wilkerson J., Farin F.M. The association between genetic polymorphisms of coproporphyrinogen oxidase and an atypical porphyrinogenic response to mercury exposure in humans. *Toxicology and Applied Pharmacology* 2005; 206(2): 113-120.

12. Ou X., Xiao C., Jiang J., Liu X., Liu L., Lu Y., et al. Interplay analysis of lead exposure with key cardiovascular gene polymorphisms on blood pressure in a cross-sectional study of occupational workers. *Scientific Reports* 2024 Nov 22; 14(1): 28936.
13. Deng Y., Wen Y., Duan W., Zhao Z., Li G., Zhou J., et al. Interactive effects between lead-cadmium co-exposure and VEGFA gene polymorphisms on renal dysfunction: a gene–environment interaction study. *Frontiers in Public Health* 2025 Sep 25; 13: 1627634.
14. Szymańska-Chabowska A., Łaczmański Ł., Jędrychowska I., Chabowski M., Gać P., Janus A., et al. The relationship between selected VDR, HFE and ALAD gene polymorphisms and several basic toxicological parameters among persons occupationally exposed to lead. *Toxicology* 2015; 334: 12–21.
15. Шаихова Д.Р., Кикоть А.М., Берёза И.А., Сутункова М.П., Брагина И.В., Гурвич В.Б. Экспрессия генов репарации ДНК у работников производства свинца из вторичного сырья. *Медицина труда и промышленная экология* 2024; 64(9): 628–632.
16. Taketani S., Furukawa T., Furuyama K. Expression of coproporphyrinogen oxidase and synthesis of hemoglobin in human erythroleukemia K562 cells. *European journal of biochemistry* 2001; 268(6): 1705–11.
17. Li T., Woods J. Cloning, expression, and biochemical properties of CPOX4, a genetic variant of coproporphyrinogen oxidase that affects susceptibility to mercury toxicity in humans. *Toxicological sciences: an official journal of the Society of Toxicology* 2009; 109(2): 228–36.
18. Yan Y., Kato H., Sano S., Furukawa E., Michimata D., Tanaka Y., et al. Roles for Heme Synthesis in the Maintenance of Hematopoietic Stem and Progenitor Cells. *Blood* 2023; 142(Supplement 1): 2682.
19. Honda M., Narumi S., Hasegawa K., Goto Y., Kawashima Y., Ohara O., et al. Coproporphyrinogen oxidase deficiency causes primary adrenal insufficiency and 46XY DSD. *The Journal of clinical endocrinology and metabolism* 2025 Dec 18; 111(1): e83–e91.
20. Woods J.S., Heyer N.J., Russo J.E., Martin M.D., Farin F.M. Genetic polymorphisms affecting susceptibility to mercury neurotoxicity in children: summary findings from the Casa Pia Children's Amalgam clinical trial. *Neurotoxicology* 2014 Sep; 44: 288–302.

References:

1. Cuomo D., Foster M., Threadgill D. Systemic review of genetic and epigenetic factors underlying differential toxicity to environmental lead (Pb) exposure. *Environmental Science and Pollution Research* 2022; 29: 35583–35598.

2. García-Léston J., Roma-Torres J., Vilares M., Pinto R., Prista J., Teixeira J., et al. Genotoxic effects of occupational exposure to lead and influence of polymorphisms in genes involved in lead toxicokinetics and in DNA repair. *Environment international* 2012; 43: 29–36.
3. Yang P., Ji T., Yang Z., Song J., Liu H. Haixia Fan Relationship between lead exposure and different types of hypertension: systematic review and dose–response meta-analysis. *Front Public Health*. 2025; 10; 13:1706805.
4. Howard J.A., David L., Lux F., Tillement O. Low-level, chronic ingestion of lead and cadmium: The unspoken danger for at-risk populations. *J Hazard Mater*. 2024; 478: 135361.
5. Rocha A., Trujillo K.A. Neurotoxicity of low-level lead exposure: History, mechanisms of action, and behavioral effects in humans and preclinical models. *Neurotoxicology*. 2019; 73: 58–80.
6. Wang X., Liang H., Wang Y., Cai C., Li J., Li X. et al. Risk factors of renal dysfunction and their interaction in level-low lead exposure paint workers. *BMC Public Health*. 2018; 18(1): 526.
7. Ding N., Wang X., Weisskopf M., Sparrow D., Schwartz J., Hu H., et al. Lead-Related Genetic Loci, Cumulative Lead Exposure and Incident Coronary Heart Disease: The Normative Aging Study. *PLoS ONE* 2016 Sep 1; 11(9): e0161472.
8. Mani M.S., Kabekkodu S.P., Joshi M.B., Dsouza H.S. Ecogenetics of lead toxicity and its influence on risk assessment. *Hum Exp Toxicol*. 2019; 38(9): 1031–1059.
9. Stajniko A., Palir N., Snoj T.J., Mazej D., Sešek Briški A., Runkel A.A. et al. Genetic susceptibility to low-level lead exposure in men: Insights from ALAD polymorphisms. *Int J Hyg Environ Health*. 2024; 256: 114315.
10. Wang K., Meng Y., Wang T., Tu Y., Gong S., Zhang G. et al. Global and gene-specific promoter methylation, and micronuclei induction in lead-exposed workers: A cross-sectional study. *Environ Mol Mutagen*. 2021; 62(7): 428–434.
11. Woods J.S., Echeverria D., Heyer N.J., Simmonds P.L., Wilkerson J., Farin F.M. The association between genetic polymorphisms of coproporphyrinogen oxidase and an atypical porphyrinogenic response to mercury exposure in humans. *Toxicology and Applied Pharmacology* 2005; 206(2): 113-120.
12. Ou X., Xiao C., Jiang J., Liu X., Liu L., Lu Y., et al. Interplay analysis of lead exposure with key cardiovascular gene polymorphisms on blood pressure in a cross-sectional study of occupational workers. *Scientific Reports* 2024 Nov 22; 14(1): 28936.
13. Deng Y., Wen Y., Duan W., Zhao Z., Li G., Zhou J., et al. Interactive effects between lead-cadmium co-exposure and VEGFA gene polymorphisms on renal dysfunction: a

gene–environment interaction study. *Frontiers in Public Health* 2025 Sep 25; 13: 1627634.

14. Szymańska-Chabowska A., Łaczmański Ł., Jędrychowska I., Chabowski M., Gać P., Janus A., et al. The relationship between selected VDR, HFE and ALAD gene polymorphisms and several basic toxicological parameters among persons occupationally exposed to lead. *Toxicology* 2015; 334: 12–21.

15. Shaikhova D.R., Kikot A.M., Bereza I.A., Sutunkova M.P., Bragina I.V., Gurvich V.B. Expression of DNA repair genes in workers producing lead from recycled materials. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology* 2024; 64(9): 628–632. (In Russ.)

16. Taketani S., Furukawa T., Furuyama K. Expression of coproporphyrinogen oxidase and synthesis of hemoglobin in human erythroleukemia K562 cells. *European journal of biochemistry* 2001; 268(6): 1705–11.

17. Li T., Woods J. Cloning, expression, and biochemical properties of CPOX4, a genetic variant of coproporphyrinogen oxidase that affects susceptibility to mercury toxicity in humans. *Toxicological sciences: an official journal of the Society of Toxicology* 2009; 109(2): 228–36.

18. Yan Y., Kato H., Sano S., Furukawa E., Michimata D., Tanaka Y., et al. Roles for Heme Synthesis in the Maintenance of Hematopoietic Stem and Progenitor Cells. *Blood* 2023; 142(Supplement 1): 2682.

19. Honda M., Narumi S., Hasegawa K., Goto Y., Kawashima Y., Ohara O., et al. Coproporphyrinogen oxidase deficiency causes primary adrenal insufficiency and 46XY DSD. *The Journal of clinical endocrinology and metabolism* 2025 Dec 18; 111(1): e83–e91.

20. Woods J.S., Heyer N.J., Russo J.E., Martin M.D., Farin F.M. Genetic polymorphisms affecting susceptibility to mercury neurotoxicity in children: summary findings from the Casa Pia Children's Amalgam clinical trial. *Neurotoxicology* 2014 Sep; 44: 288–302.

Информация об авторах

Дарья Рамильевна Шаихова – научный сотрудник отдела молекулярной биологии и электронной микроскопии ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора. (620014, г. Екатеринбург, email: darya.boa@mail.ru ORCID iD: 0000-0002-7029-3406)

Анна Михайловна Кикоть – научный сотрудник отдела молекулярной биологии и электронной микроскопии ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора. (620014, г. Екатеринбург, email: kikotam@ymrc.ru ORCID iD: 0000-0001-8794-7288)

Иван Андреевич Берёза – научный сотрудник отдела молекулярной биологии и электронной микроскопии ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (620014, г. Екатеринбург, email: berezaia@ymrc.ru ORCID iD: 0000-0002-4109-9268)

Дарья Дмитриевна Полянина – младший научный сотрудник отдела молекулярной биологии и электронной микроскопии ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора. (620014, г. Екатеринбург, email: polyaninadd@ymrc.ru ORCID iD: 0009-0007-5046-0207)

Боковой Вячеслав Дмитриевич – лаборант отдела молекулярной биологии и электронной микроскопии ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора. (620014, г. Екатеринбург, e-mail: bokovoyvd@ymrc.ru ORCID iD: 0000-0002-6551-3937)

Марина Петровна Сутункова – доктор медицинских наук, директор ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора; заведующая кафедрой гигиены и медицины труда. (620014, г. Екатеринбург, email: sutunkova@ymrc.ru ORCID iD: 0000-0002-1743-7642)

Author information

Daria R. Shaikhova – Researcher, Department of Molecular Biology and Electron Microscopy, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg, Russian Federation; e-mail: darya.booo@mail.ru; ORCID iD: 0000-0002-7029-3406).

Anna M. Kikot – Researcher, Department of Molecular Biology and Electron Microscopy, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg, Russian Federation; e-mail: kikotam@ymrc.ru; ORCID iD: 0000-0001-8794-7288).

Ivan A. Bereza – Researcher, Department of Molecular Biology and Electron Microscopy, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg, Russian Federation; e-mail: berezaia@ymrc.ru; ORCID iD: 0000-0002-4109-9268).

Daria D. Polianina – Junior Researcher, Department of Molecular Biology and Electron Microscopy, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg, Russian Federation; e-mail: polyaninadd@ymrc.ru; ORCID iD: 0009-0007-5046-0207).

Vyacheslav D. Bokovoy – Laboratory Assistant, Department of Molecular Biology and Electron Microscopy, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg, Russian Federation; e-mail: bokovoyvd@ymrc.ru; ORCID iD: 0000-0002-6551-3937).

Marina P. Sutunkova – Doctor of Medical Sciences, Director, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg, Russian Federation); Head of the Department of Occupational Hygiene and Medicine, Ural State Medical University (620028, Yekaterinburg, Russian Federation; e-mail: sutunkova@ymrc.ru; ORCID iD: 0000-0002-1743-7642).

Поступила/Received: 22.05.2026

Принята в печать/Accepted: 15.06.2026

УДК 616.31:579:636.5:323.333

ДИСБИОТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОБИОТЫ СЛИЗИСТОЙ ОБОЛОЧКИ ПОЛОСТИ РТА И ГЛОТКИ У РАБОТНИКОВ ПТИЦЕВОДСТВА

Гизатуллина Л.Г.¹, Бакиров А.Б.^{1,2,3}, Масагутова Л.М.^{1,2}, Калимуллина С.Н.¹,
Ахметова Г.Н.¹, Зайдуллин И.И.¹, Чудновец Г.М.¹.

¹ ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», Уфа, Россия

² ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет»,
Уфа, Россия

³ ГБНУ «Академия наук Республики Башкортостан», Уфа, Россия

В статье представлен сравнительный анализ результатов изучения количественных и качественных изменений микрофлоры слизистой оболочки полости рта и глотки работников птицеводства в зависимости от контакта с обрабатываемой птицей. Установлены ключевые представители условно-патогенной микрофлоры, ассоциированные с профессиональной нагрузкой. Полученные результаты свидетельствуют о том, что профессиональный контакт с обрабатываемой птицей сопровождается перестройкой микробиоты слизистой оболочки полости рта и глотки работников. В опытной группе доминируют *Bacillus* spp, *Staphylococcus epidermidis*, *Candida albicans* и *Enterococcus faecalis*. Эти микроорганизмы могут выступать в качестве микробных маркеров профессиональной экспозиции.

Цель исследования – оценить качественные и количественные дисбиотические изменения микробиоты слизистой оболочки полости рта и глотки и установить ключевые доминирующие виды микроорганизмов, ассоциированные с профессиональной нагрузкой у работников птицеводства.

Материалы и методы. В исследование были включены 60 работников, сопоставимые по полу и возрасту, из которых 30 человек (основная группа) имели непосредственный контакт с птицей и продуктами птицеводства и 30 работников (группа сравнения), не имеющие профессионального контакта с сельскохозяйственной птицей - административно-вспомогательный персонал. Критерии включения: стаж работы не менее 3 лет, ежедневный контакт с птицей и продуктами птицеводства. Материалом для проведения микробиологических исследований служили мазки, взятые со слизистой оболочки полости рта и глотки (60 проб). Сравнительный и фактурный анализ полученных результатов

проводился с помощью статистических методов и с применением индексов сходства (Жаккара и Коха), экологических индексов Шеннона, Симпсона, Маргалефа и Пиелу.

Результаты. Условия труда работников соответствуют классам 3.2 – 3.4 – вредный второй-четвертой степени. Из 60 проб исследуемого биоматериала слизистой оболочки полости рта и глотки работников птицеводства были выделены микроорганизмы, принадлежащие к следующим семействам: Staphylococcaceae – 29,33%, Streptococcaceae – 14,42%, Enterococcaceae – 9,14%, Saccharomycetaceae – 10,1%, Enterobacteriaceae – 8,17 %, Pseudomonadaceae около 0,5 %. Установлено, что во всех случаях (100 %) выделяемые микроорганизмы присутствовали в виде полимикробных ассоциаций.

Ограничения исследования. Относительно небольшая выборка и исследование работников одного предприятия может ограничивать корректное обобщение результатов.

Заключение. Комплекс производственных факторов сельскохозяйственного производства способствует нарушению соотношения микробных ассоциаций даже на фоне клинического здоровья, что является фактором риска развития воспалительных процессов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что профессиональный контакт с обрабатываемой птицей сопровождается перестройкой микробиоты слизистой оболочки полости рта и глотки работников. В основной группе доминируют *Bacillus* spp, *Staphylococcus epidermidis*, *Candida albicans* и *Enterococcus faecalis*. Эти микроорганизмы могут выступать в качестве микробных маркеров профессиональной экспозиции.

Ключевые слова: условно-патогенная микрофлора, микробиота слизистой оболочки полости рта и глотки, профессиональный контакт, работники птицеводства

Соблюдение этических стандартов. Настоящее исследование проведено в соответствии с Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (принципы добровольности, конфиденциальности, минимизации вреда); Федеральному закону № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» (статья 20 – добровольное информированное согласие); Федеральному закону N 152-ФЗ «О персональных данных»; Этическим стандартам и внутренним нормативным документам ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека». Одобрено Комитетом по этике ФБУН «Уфимский НИИ

медицины труда и экологии человека» (15.06.2026/№02-06). От всех участников было получено добровольное информированное согласие.

Использование инструментов искусственного интеллекта. При подготовке рукописи был использован *GigaChat-2* для проверки орфографии текста на английском языке в период с 22.06.2026 по 30.06.2026 г. Научная интерпретация, анализ полученных данных и выводы выполнены авторами самостоятельно; авторы несут полную ответственность за содержание статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Гизатуллина Л.Г., Бакиров А.Б., Масыгутова Л.М., Калимуллина С.Н., Ахметова Г.Н., Зайдуллин И.И., Чудновец Г.М. Дисбиотические изменения микробиоты слизистой оболочки полости рта и глотки у работников птицеводства. Медицина труда и экология человека. 2026; 3 : 124-147.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10307>

Для корреспонденции: Лилия Галиевна Гизатуллина, e-mail: Instityt.Ufa@mail.ru

DISBIOTIC CHANGES OF THE MICROBIOME OF THE ORAL AND PHARYNGEAL MUCOUS MEMBRANE IN POULTRY WORKERS.

Gizatullina L.G.¹, Bakirov A.B.^{1,2,3}, Masyagutova I.M.^{1,2}, Kalimullina S.N.¹, Akhmetova G.N.¹, Zaidullin I.I.¹, Chudnovets G.M.¹.

¹ Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, Russia

² Bashkir State Medical University, Ufa, Russia

³ GBNU "Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan", Ufa, Russia

The article presents a comparative analysis of the results of studying the quantitative and qualitative changes in the microflora of the oral mucosa and pharynx of poultry workers, depending on their contact with processed poultry. The article identifies key representatives of the opportunistic microflora associated with professional stress. The results indicate that professional contact with processed poultry is accompanied by a restructuring of the microflora of the oral mucosa and pharynx of workers. In the experimental group, *Bacillus* spp, *Staphylococcus epidermidis*, *Candida albicans*, and

Enterococcus faecalis dominate. These microorganisms can act as microbial markers of occupational exposure.

The objective of the study to assess the qualitative and quantitative dysbiotic changes in the microbiota of the oral and pharyngeal mucosa and to identify the key dominant microbial species associated with occupational stress in poultry workers.

Materials and methods. The study included 60 employees who were comparable in terms of gender and age, of which 30 employees (the main group) had direct contact with poultry and poultry products, and 30 employees (the comparison group) who did not have professional contact with poultry, including administrative and support personnel. The inclusion criteria were a work experience of at least 3 years and daily contact with poultry and poultry products. The material for microbiological studies was obtained from swabs taken from the oral mucosa and pharynx (60 samples). The comparative and factual analysis of the obtained results was carried out using statistical methods and similarity indices (Jaccard and Koch), as well as Shannon, Simpson, Margalef, and Pielou ecological indices.

Results. The working conditions of employees correspond to classes 3.2 – 3.4 – harmful to the second and fourth degrees. From 60 samples of the oral mucosa and pharynx of poultry workers, microorganisms belonging to the following families were isolated: Staphylococcaceae – 29.33%, Streptococcaceae – 14.42%, Enterococcaceae – 9.14%, Saccharomycetaceae – 10.1%, Enterobacteriaceae – 8.17%, and Pseudomonadaceae – about 0.5%. It was found that in all cases (100%), the isolated microorganisms were present in the form of polymicrobial associations.

Study limitations. A relatively small sample and a study of employees from a single company may limit the accurate generalization of the results.

Conclusion. The complex of production factors in agricultural production contributes to the disruption of the ratio of microbial associations, even in the context of clinical health, which is a risk factor for the development of inflammatory processes. The main group is dominated by *Bacillus* spp, *Staphylococcus epidermidis*, *Candida albicans*, and *Enterococcus faecalis*. These microorganisms can act as microbial markers of occupational exposure. These microorganisms can serve as microbial markers of professional exposure.

Keywords: opportunistic pathogens, oral and pharyngeal mucosa microbiota, occupational exposure, and poultry workers

Compliance with ethical standards: This study conducted in accordance with the World Medical Association's Declaration of Helsinki (principles of voluntariness, confidentiality, and minimization of harm); Federal Law No. 323-FZ "On the Fundamentals of Protecting the Health of Citizens in the Russian Federation" (Article 20 - voluntary informed consent); Federal Law No. 152-FZ "On Personal Data"; and the Ethical Standards and Internal Regulations of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology. Approved by the Ethics Committee of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology (15.06.2026/No. 02-06). Voluntary informed consent was obtained from all participants.

Declaration of AI use. When preparing the manuscript, GigaChat-2 was used to check the spelling of the text in English between 22.06.2026 and 30.06.2026. The scientific interpretation, analysis of the obtained data, and conclusions were made by the authors independently; the authors are fully responsible for the content of the article.

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Funding: the study had no sponsorship.

For citation: Gizatullina L.G., Bakirov A.B., Masyagutova L.M., Kalimullina S.N., Akhmetova G.N., Zaydullin I.I., Chudnovets G.M. Disbiotic changes of the microbiome of the oral and pharyngeal mucous membrane in poultry workers. Occupational health and human ecology. 2026; 3 : 124-147.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10307>

For correspondence: Lilia G. Gizatullina, e-mail: Instityt.Ufa@mail.ru

Птицеводство по праву занимает лидирующие позиции в аграрном секторе, демонстрируя высокую рентабельность и производительность [1]. Птицеводство – одно из наиболее важных направлений сельского хозяйства России, имеющее большое значение как для внутреннего рынка, так и для экспорта. На протяжении последних лет производство птицы в России активно развивается. Федеральные округа страны имеют различный уровень развития птицеводства, что влияет на общий объем производства. Наибольшее количество птицеводческих предприятий сосредоточено в Центральном, Северо-Западном и Приволжском федеральных округах. Здесь созданы условия для эффективного развития птицеводства, что способствует увеличению объемов производства [2].

Птицеводческие предприятия представляют собой экологические системы с высоким микробным загрязнением воздуха, где человек и птица находятся в

тесном контакте. Работники птицефабрик подвергаются хроническому ингаляционному воздействию аэрогенной микрофлоры, включающей как сапрофитные, так и условно-патогенные микроорганизмы. При этом использование антимикробных препаратов для обработки птицы может модифицировать микробиом верхних дыхательных путей персонала, однако системных исследований по данной проблеме недостаточно. Спецификой птицеводческих производств являются различия в составе резистома между работниками, занятыми на разных позициях (например, на линии убоя) и на разных этапах производства [3,4,5].

Неблагоприятные факторы производственной среды и трудового процесса могут вызывать заболевания лор-органов, так как происходит дисбиоз с изменением качественного и количественного состава микробиоты, что в свою очередь выражается в элиминации постоянной флоры и колонизации патогенными и условно-патогенными бактериями. Снижается не только качество жизни макроорганизма, но и что особенно важно повышается риск распространения антибиотикорезистентности - глобальной проблемы всего человечества [6,7,8].

Цель исследования – оценить качественные и количественные дисбиотические изменения микробиоты слизистой оболочки полости рта и глотки и установить ключевые доминирующие виды микроорганизмов, ассоциированные с профессиональной нагрузкой у работников птицеводства.

Материалы и методы. В исследование были включены 60 работников, сопоставимые по полу и возрасту, из которых 30 человек (основная группа) имели непосредственный контакт с птицей и продуктами птицеводства. Критерии включения: стаж работы не менее 3 лет, ежедневный контакт с птицей и продуктами птицеводства. И 30 работников (группа сравнения), не имеющие профессионального контакта с сельскохозяйственной птицей - административно-вспомогательный персонал. Оценены качественные и количественные изменения микробиоценоза слизистой оболочки полости рта и глотки у работников птицеводства, не имеющих воспалительных процессов или клинических проявлений ЛОР-заболеваний, но с профессиональной нагрузкой. Проведен сравнительный анализ микробиоты слизистой оболочки полости рта и глотки между группами работников. Материалом служили мазки со слизистой оболочки полости рта и глотки (60 проб), взятые во время проведения периодического медицинского осмотра работников птицеводства. Биоматериал из ротоглотки забирался стерильным одноразовым тампоном и погружался в готовую транспортную среду с наполнителем Амиес, специализированный набор для

забора и транспортировки. Для получения достоверных результатов, посев биоматериала делали в первые 24 часа. Микробиологический анализ, включающий выделение, индикацию и идентификацию микроорганизмов проводили стандартными общепринятыми бактериологическими методами с использованием простых, элективных, дифференциально-диагностических и хромогенных сред. Родовую и видовую идентификацию микроорганизмов осуществляли с помощью биохимических диагностических мультимикротестов. Морфологию выделенных штаммов бактерий – чистых культур изучали в мазках, выросших на агаровых средах, окрашенных по Граму. Патогенность выделенных возбудителей устанавливали с помощью постановок химических реакций, в частности патогенность культур стафилококка проверяли при помощи реакции плазмокоагуляции с кроличьей цитратной плазмой. В работе учитывали наличие 34 таксонов, относящихся к 14 семействам (*Saccharomycetaceae*, *Bacillaceae*, *Micrococcaceae*, *Enterococcaceae*, *Streptococcaceae*, *Staphylococcaceae*, *Pseudomonadaceae*, *Acinetobacter*, *Enterobacteriaceae*, *Morganellaceae*, *Corynebacteriaceae*, *Neisseriaceae*). Для оценки значимости потенциального патогена учитывались результаты исследования в титре не менее 10^5 КОЕ/тампон. Для подтверждения качества выполнения исследований по выделению и идентификации проводился внутрилабораторный контроль с использованием специальных контрольных штаммов из Государственной коллекции патогенных микроорганизмов и клеточных культур (Россия).

Статистический анализ полученных результатов проводили с применением статистических критериев Колмогорова-Смирнова и Шапиро Уилка, а также непараметрических критериев Манна-Уитни, для сравнения частот – χ^2 -критерий Пирсона, для сравнения средних долей – t-критерий Стьюдента для независимых выборок. Корреляционный анализ – коэффициент Пирсона для бинарных переменных. Критический уровень значимости принят $p < 0,05$. Изучение экологических последствий перестройки на уровне видового состава (видового богатства и видового разнообразия) сообществ симбиотических микроорганизмов ротоглотки работников был проведен с применением индексов сходства (Жаккара и Коха), экологических индексов Шеннона, Симпсона, Маргалефа и Пиелу [9,10]. Для расчетов использовали программу Statistica 10 (StatSoft Inc., США).

Результаты. Из 60 проб исследуемого биоматериала слизистой оболочки полости рта и глотки работников птицеводства были выделены микроорганизмы, принадлежащие к следующим семействам: *Staphylococcaceae* – 29,33%,

Streptococcaceae – 14,42%, Enterococcaceae – 9,14%, Saccharomycetaceae – 10,1%, Enterobacteriaceae – 8,17 %, Pseudomonadaceae около 0,5 % (рисунок 1).

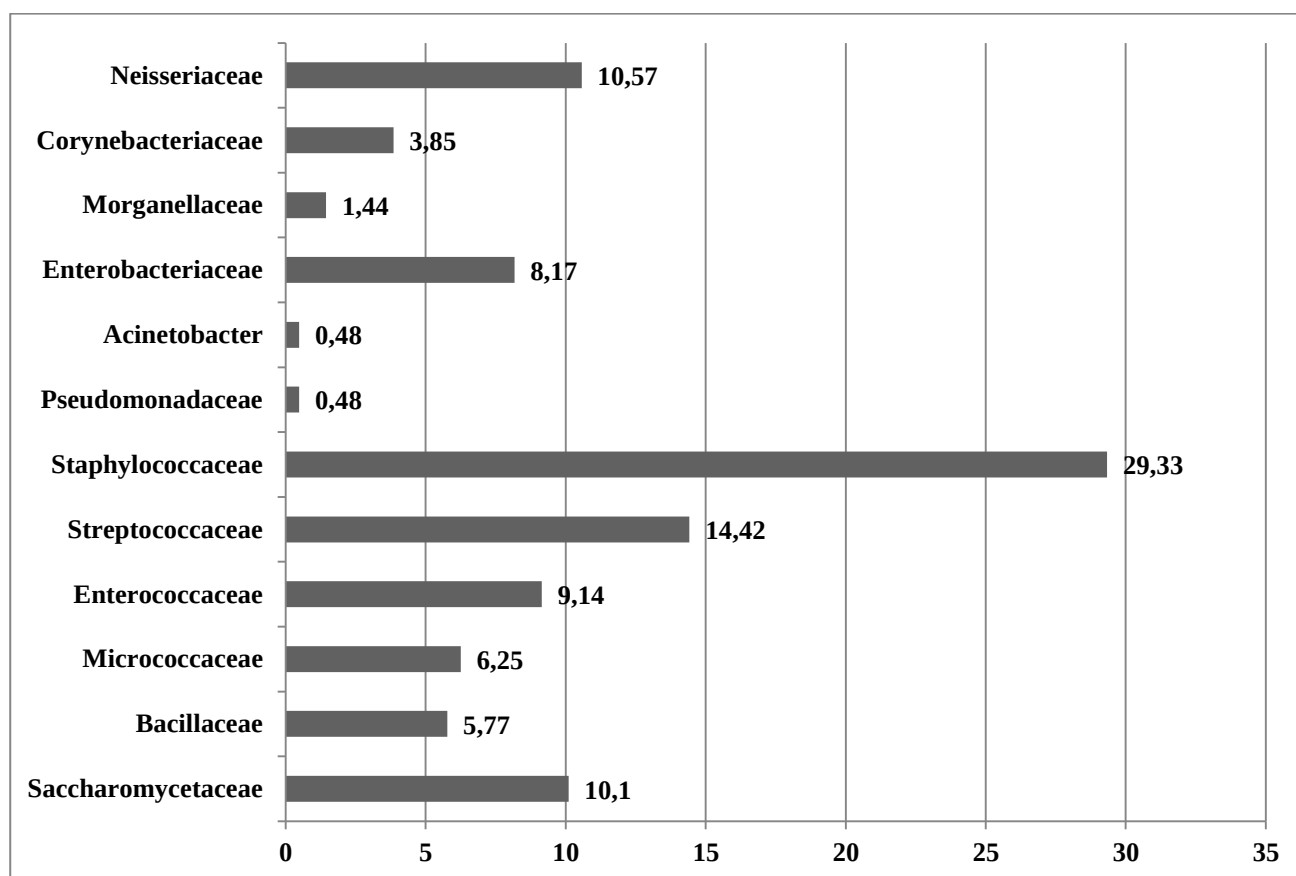


Рисунок 1. Видовой состав микрофлоры, выделенной из слизистой оболочки полости рта и глотки работников птицеводства, %

Figure 1. Species composition of the microflora isolated from the oral mucosa and pharynx of poultry workers, %

Чаще всего идентифицировали *Candida albicans*, *Bacillus* spp., *Staphylococcus epidermidis* и *Enterococcus faecalis*. Кроме указанных выше возбудителей было изолировано значительное количество *Corynebacterium* spp., *Neisseria* spp. и другие виды кокковой флоры (таблица 1). Полученные данные подтверждаются другими исследованиями [11,12,13,14].

Таблица 1. Спектр и частота обнаружения микроорганизмов, выделенных из слизистой оболочки полости рта и глотки у работников птицеводства.

Table 1. Spectrum and frequency of detection of microorganisms isolated from the oral mucosa and pharynx of poultry workers.

№	Микроорганизм	Основная группа (n=30), абс. (%)	Контрольная группа (n=30), абс. (%)	χ^2	p (χ^2)	p (M-W)
1	Candida albicans	12 (40,0)	3 (10,0)	8,52	0,0035*	<0,001*
2	Candida krusei	4 (13,3)	1 (3,3)	2,96	0,085	0,081
3	Candida grabrata	3 (10,0)	3 (10,0)	0,00	1,000	0,952
4	Candida tropicalis	5 (16,7)	2 (6,7)	2,45	0,118	0,104
5	Bacillus spp.	15 (50,0)	7 (23,3)	6,24	0,0125*	0,008*
6	Micrococcus spp.	9 (30,0)	11 (36,7)	0,42	0,517	0,491
7	Enterococcus faecalis	9 (30,0)	4 (13,3)	4,02	0,045*	0,039*
8	Enterococcus faecium	6 (20,0)	5 (16,7)	0,15	0,698	0,672
9	Enterococcus durans	2 (6,7)	0 (0)	2,16	0,142	0,152
10	Streptococcus agalactiae	2 (6,7)	3 (10,0)	0,22	0,638	0,642
11	Streptococcus mitis	8 (26,7)	16 (53,3)	6,24	0,0125*	<0,001*
12	Streptococcus pyogenes	6 (20,0)	8 (26,7)	0,52	0,471*	0,043*
13	Streptococcus pneumoniae	6 (20,0)	5 (16,7)	0,15	0,698	0,519
14	Streptococcus sanguis	5 (16,7)	3 (10,0)	0,82	0,365	0,341
15	Staphylococcus aureus	5 (16,7)	2 (6,7)	2,45	0,118	0,104
16	Staphylococcus epidermidis	21 (70,0)	29 (96,7)	7,50	0,0062*	<0,001*
17	Staphylococcus haemolyticus	3 (10,0)	2 (6,7)	0,22	0,638	0,642
18	Staphylococcus saprophyticus	5 (16,7)	7 (23,3)	0,57	0,450	0,472
19	Staphylococcus	4 (13,3)	6 (20,0)	0,58	0,446	0,531

	cohnii					
20	Staphylococcus xylosus	8 (26,7)	5 (16,7)	1,27	0,260	0,193
21	Staphylococcus lentus	1 (3,3)	0 (0)	1,02	0,312	0,317
22	Pseudomonas putida	1 (3,3)	0 (0)	1,02	0,312	0,317
23	Acinetobacter baumannii	1 (3,3)	0 (0)	1,02	0,312	0,317
24	Escherichia coli	3 (10,0)	2 (6,7)	0,22	0,638	0,642
25	Citrobacter freundii	3 (10,0)	2 (6,7)	0,22	0,638	0,642
26	Citrobacter diversus	1 (3,3)	0 (0)	1,02	0,312	0,317
27	Klebsiella pneumoniae	2 (6,7)	3 (10,0)	0,22	0,638	0,642
28	Serratia marcescens	1 (3,3)	0 (0)	1,02	0,312	0,317
29	Enterobacter aerogenes	1 (3,3)	0 (0)	1,02	0,312	0,317
30	Enterobacter gergoviae	1 (3,3)	0 (0)	1,02	0,312	0,317
31	Serratia fonticola	3 (10,0)	0 (0)	3,37	0,066	0,061
32	Morganella morganii	3 (10,0)	1 (3,3)	1,67	0,196	0,192
33	Corynebacterium spp.	8 (26,7)	5 (16,7)	1,27	0,260	0,047*
34	Neisseria spp.	12 (40,0)	23 (76,7)	10,03	0,0015*	<0,001*

*различия, статистически значимые по обоим критериям ($p < 0,05$)

*differences statistically significant by both criteria ($p < 0.05$).

При анализе 60 проб, взятых со слизистой оболочки полости рта и глотки установлено, что во всех случаях (100 %) выделяемые микроорганизмы присутствовали в виде полимикробных ассоциаций. Рост микрофлоры в виде монокультуры в обеих исследуемых группах работников не выявлено. Среднее количество видов для одной пробы в основной группе незначительно, но формируется более высокое среднее видовое разнообразие, ($p > 0,05$). Среднее число видов на образец в основной группе составило $8,93 \pm 2,86$, в контрольной – $8,23 \pm 3,12$, что свидетельствует о сопоставимом уровне микробного

разнообразия. В обеих группах доминирующей парой является ассоциация *Candida albicans* и *Staphylococcus epidermidis* (40,0 % и 36,7 % соответственно), что может указывать на синергидные взаимоотношения между условно-патогенными грибами и коагулазоотрицательными стафилококками в биотопе слизистой оболочки полости рта и глотки (Таблица 2).

Таблица 2. Частота встречаемости доминирующих бинарных микробных ассоциаций в образцах со слизистой оболочки полости рта и глотки основной и контрольной группах

Table 2. The frequency of occurrence of dominant binary microbial associations in samples from the oral mucosa and pharynx of the experimental and control groups

Основная группа (n = 30)			Контрольная группа (n = 30)		
Ассоциация (виды)	Число образцов	Встречаемость (%)	Ассоциация (виды)	Число образцов	Встречаемость (%)
<i>Candida albicans</i> + <i>Staphylococcus epidermidis</i>	12	40,0 %	<i>Candida albicans</i> + <i>Staphylococcus epidermidis</i>	11	36,7 %
<i>Staphylococcus epidermidis</i> + <i>Neisseria spp</i>	9	30,0 %	<i>Staphylococcus epidermidis</i> + <i>Neisseria spp.</i>	10	33,3 %
<i>Candida albicans</i> + <i>Streptococcus mitis</i>	9	30,0 %	<i>Candida albicans</i> + <i>Streptococcus mitis</i>	8	26,7 %
<i>Staphylococcus epidermidis</i> + <i>Corynebacterium spp.</i>	8	26,7 %	<i>Staphylococcus epidermidis</i> + <i>Corynebacterium spp.</i>	8	26,7 %
<i>Enterococcus faecalis</i> + <i>Staphylococcus epidermidis</i>	8	26,7 %	<i>Enterococcus faecalis</i> + <i>Staphylococcus epidermidis</i>	7	23,3 %
<i>Candida albicans</i> + <i>Bacillus spp.</i>	7	23,3 %	<i>Candida albicans</i> + <i>Staphylococcus xylosum</i>	6	20,0 %

* Примечание: представлены ассоциации, встречающиеся не менее чем в 15 % образцов в одной из групп

* Note: Associations present in at least 15% of samples in one of the groups are shown

Среди доминирующих видов лидирующие позиции занимали *C. albicans*, *S. epidermidis* и *Neisseria spp.*, встречаемость которых варьировала от 26,7 до 36,7 %. Ряд видов (*A. baumannii*, *C. freundii*, *P. putida*, *M. morganii*) регистрировались исключительно в основной группе, однако с низкой частотой (3,3 %), что требует дополнительного подтверждения на расширенной выборке.

Для количественной оценки видовой структуры использовали синэкологический анализ, характеризующийся не только показателями видового богатства, но и видового разнообразия, были рассчитаны четыре классических экологических индекса для каждого образца: индекс Шеннона (H'), показывающий общее видовое разнообразие, индекс Симпсона (D), отражающий степень доминирования видов, индекс Маргалефа (R), оценивающий видовое богатство и индекс Пиелу (J), характеризующий насколько равномерно виды представлены в сообществе (Таблица 3).

Таблица 3. Средние значения экологических индексов ($M \pm SD$)

Table 3. Average values of environmental indices ($M \pm SD$)

Индекс	Основная группа	Контрольная группа	p (M-W)
Шеннон (H')	$1,27 \pm 0,41$	$1,54 \pm 0,38$	0,008
Симпсон (D)	$0,58 \pm 0,14$	$0,69 \pm 0,11$	0,003
Маргалеф (R)	$1,82 \pm 0,52$	$2,14 \pm 0,49$	0,015
Пиелу(J)	$0,61 \pm 0,13$	$0,72 \pm 0,10$	0,001

В основной группе наблюдается статистически значимое снижение всех показателей разнообразия по сравнению с контролем. Это указывает на обеднение видовой структуры микробиоты слизистой оболочки полости рта и глотки под влиянием профессиональных факторов: снижается общее число микроорганизмов (индекс Маргалефа), уменьшается выравненность (индекс Пиелу), формируется доминирование отдельных видов, становится более выраженным (снижение индексов Шеннона и Симпсона). Такая перестройка типична для экосистем, испытывающих хронический стресс, и может быть связана с селективным давлением антибиотиков, дезинфектантов или специфических условий микроклимата птицефабрики.

Для оценки перестройки видовой структуры (видового богатства и видового разнообразия) сообществ симбиотических микроорганизмов ротоглотки

сравниваемых групп был проведен расчёт индексов сходства Жаккара и Коха (Таблица 4).

Таблица 4. Внутригрупповое сходство (среднее попарное значение) выделенных микроорганизмов со слизистой оболочки полости рта и глотки в основной и контрольной группах.

Table 4. Intragroup similarity (mean pairwise value) of the isolated microorganisms from the oral mucosa and pharynx in the experimental and control groups.

Группа	Индекс Жаккара	Индекс Коха
Основная	0,21 ± 0,08	0,34 ± 0,10
Контрольная	0,29 ± 0,07	0,44 ± 0,09
p (M–W)	0,002	0,001

Полученные результаты свидетельствуют о более низком внутригрупповом сходстве в основной группе. Это означает, что микробиота ротоглотки работников птицеводства основной группы более вариабельна и менее стабильна, чем у контрольной группы. Увеличение межиндивидуальной вариабельности на фоне снижения общего разнообразия является характерным признаком дисбиотических изменений: в условиях стресса у разных индивидов выживают разные резистентные бактерии, что приводит к «индивидуализации» микробного профиля.

Так же была проведена оценка индекса дисбиоза (ИД) — это количественный показатель, отражающий степень нарушения баланса (дисбаланса) микробиоты (совокупности микроорганизмов) в каком-либо биотопе организма. Индекс рассчитывают на основе анализа конкретных групп микроорганизмов в исследуемом материале. Для каждого показателя могут быть свои баллы или оценки, а итоговый индекс — это, по сути, средневзвешенное значение или сумма отклонений от референсных (нормальных) значений.

Таблица 5. Групповой индекс дисбиоза

Table 5. The group index of dysbiosis

Группа	Сумма частот УП	Сумма частот сапрофитов	Индекс дисбиоза	Интерпретация
Основная группа (n=30)	75	57	1.32	Умеренный дисбиоз

Контрольная группа (n=30)	43	35	1.23	Умеренный дисбиоз
Сравнение	—	—	U = 420.5, p = 0.582	Различия незначимы

Таблица 6. Индивидуальный индекс дисбиоза (для каждого работника)

Table 6. Individual dysbiosis index (for each employee)

Группа	Средний индекс	SD	Медиана	Min	Max
Основная группа (n=30)	0.96	0.84	0.75	0.00	3.50
Контрольная группа (n=30)	1.02	0.89	0.80	0.00	3.00
Сравнение	U = 425.0, p = 0.632	—	—	—	—

Таблица 7. Распределение по категориям дисбиоза

Table 7. Distribution by dysbiosis category

Категория	Основная группа (n=30)	Контрольная группа (n=30)	χ^2
Норма (индекс ≤ 0.5)	8 (26.7%)	9 (30.0%)	0.00
Умеренный дисбиоз ($0.5 < \text{индекс} \leq 1.5$)	12 (40.0%)	10 (33.3%)	0.07
Выраженный дисбиоз (индекс > 1.5)	10 (33.3%)	11 (36.7%)	0.00

Индекс дисбиоза (групповой и индивидуальный) не выявил значимых различий между группами ($p > 0.05$) (Таблица 5,6), что подтверждает заместительный характер перестройки микробиоты, т.е. одни условно-патогенные виды сменяются другими, но общая нагрузка остаётся прежней (Таблица 7).

Обсуждение. Из 34 видов, включённых в анализ микроорганизмов, 8 показали статистически значимые различия ($p < 0,05$) между основной группой работников и группой сравнения. Результаты исследований выявили значительное увеличение частоты встречаемости *Candida albicans* в основной группе - 40,0%, а в контроле - 10,0%, ($p < 0,001$), что может быть обусловлено хроническим стрессом и воздействием профессиональных вредностей (пыль, аммиак, микрочастицы перьев и кормов), приводящими к местному иммунодефициту слизистой ротоглотки, что создаёт благоприятные условия для дисбиоза, переходить в патогенную гифальную форму и вызывать кандидозные поражения. Кроме того, длительный контакт с антибиотиками (используемыми в птицеводстве) может приводить к селекции резистентных штаммов грибов и подавлению конкурентной микрофлоры. Известно, что *C. albicans* обладает адгезивными свойствами к эпителию, повреждённому микротравмами (например, от вдыхания кормовых частиц), что способствует длительному сохранению в макроорганизме, тем самым избегая немедленного уничтожения иммунной системой или неблагоприятных условий. Полученные результаты исследования коррелируют с литературными данными по репрезентативным группам работников сельскохозяйственных производств, демонстрирующими статистически значимое повышение частоты носительства грибов рода *Candida* по сравнению с работниками, профессионально не аффилированными с животноводством [15,16].

Повышение частоты детекции *Bacillus* spp. в основной группе (50,0% против 23,3%) объясняется, тем что они являются транзиторными микроорганизмами, поступающими из внешней среды. Птицеводческие предприятия являются средой с высокой концентрацией спорообразующих бактерий, поступающие из подстилки, помёта и кормов, устойчивы к факторам внешней среды благодаря спорам и могут длительно персистировать в дыхательных путях работников. Хотя этот таксон не является патогенным, но его высокая встречаемость служит маркером профессиональной экспозиции и подтверждает значительную микробную нагрузку на респираторный тракт работников птицеводства [17].

Увеличение частоты встречаемости *Enterococcus faecalis* в основной группе до 30,0%, относительно группы сравнения - 13,3%, ($p = 0,039$) отражает как контаминацию среды, так и микробиологические последствия хронического воздействия субтерапевтических доз антибиотиков, характерных для птицеводства. Селективное преимущество в условиях антибиотикорезистентности, а многие штаммы *E. faecalis*, обладают природной

устойчивостью к тетрациклинам и аминогликозидам, способствует к выживанию на фоне подавления чувствительной микрофлоры [18,19,20,21,22].

В ходе проведенных исследований установлено, что ряд микроорганизмов не только значимо увеличены в ротоглотке основной группы работников, но и значимо снижены. Так *Streptococcus mitis*, являющийся резидентным комменсалом и препятствующий адгезии патогенных бактерий к эпителию, его значимое снижение частоты *S. mitis* в основной группе (26,7% против 53,3%, $p < 0,001$) может быть сигналом, указывающим на утрату одного из ключевых элементов защитного микробного барьера [23,24].

Наиболее выраженное снижение частоты *Staphylococcus epidermidis* в основной группе (70,0%) и высокие показатели группы сравнения (96,7%), $p < 0,001$, может так же являться одним из ключевых маркеров микробиологической дестабилизации в ответ на комплекс профессиональных факторов.

Выраженное снижение встречаемости *Neisseria spp.* в основной группе ($p < 0,001$) не только отражает микробиологический сдвиг, но и имеет функциональные последствия: комменсальные нейссерии конкурируют с менингококком за рецепторы эпителия, и их утрата потенциально может повышать восприимчивость к бактериальным инфекциям дыхательных путей [25].

Заключение. При анализе 60 образцов слизистой оболочки полости рта и глотки работников птицеводства во всех случаях (100 %) выделены полимикробные ассоциации.

В основной группе достоверно чаще выделялись *Candida albicans*, *Bacillus spp*, *Staphylococcus epidermidis*, *Enterococcus faecalis*.

Выявленный дисбиоз, характеризуется изменением барьерных видов микроорганизмов и замещением их профессионально-ассоциированными видами, свидетельствующий о структурной деградации микробиоценоза, типичной для профессионально обусловленного экологического стресса.

Результаты исследования обосновывают необходимость внедрения системного микробиологического мониторинга и разработки профилактических мероприятий, направленных на коррекцию микробиоты и снижение профессионального риска у работников птицеводства.

Вклад авторов.

Концепция и дизайн исследования – Масягутова Л.М., Бакиров А.Б.

Сбор и обработка материала – Зайдуллин И.И., Чудновец Г.М., Гизатуллина Л.Г.

Анализ данных – Гизатуллина Л.Г., Масыгутова Л.М., Ахметова Г.Н., Калимуллина С.Н.

Написание текста и оформление статьи – Гизатуллина Л.Г., Калимуллина С.Н.

Редактирование – Масыгутова Л.М., Бакиров А.Б., Зайдуллин И.И.

Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех ее частей.

Author contribution:

Concept and design of the study – Masyagutova L.M., Bakirov A.B.

Collection and processing of material – Zaydullin I.I., Chudnovets G.M., and Gizatullina L.G.

Data analysis – Gizatullina L.G., Masyagutova L.M., Akhmetova G.N., Kalimullina S.N.

Writing the text and designing the article – Gizatullina L.G., Kalimullina S.N.

Editing – Masyagutova L.M., Bakirov A.B., Zaidullin I.I.

All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Список литературы:

1. Гофман А.А., Лыско С.Б., Задорожная М.В., Сунцова О.А. Видовой состав микрофлоры, выделяемой от сельскохозяйственной птицы. Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2025; 55(2):101-108. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2025-2-12>.
2. И.М. Глинкина, Н.А.Каширина, Н.В. Байлова, Г.М. Маслова. Производство птицепродуктов в России. В сборнике: Производство и переработка сельскохозяйственной продукции. Материалы IX международной научно-практической конференции. Воронеж, 2023. - С. - 177-184.
3. Luiken R.E.C., Van Gompel L., Bossers A. et al. Farm dust resistomes and bacterial microbiomes in European poultry and pig farms. Environment International. July 29th 2020,10.1016/j.envint.2020.105971
4. Sendron F., Persicilli C., Senchuk G., Perini F., Lasagna E., Cassandro M., Penasa M.Genet Sel Evol. Local Italian Chicken Breeds: A Comparative Analysis of Biodiversity on a Global Scale.2025 Jun 10;57(1):30. doi: 10.1186/s12711-025-00980-4.PMID: 40495128

5. Chen Y., Liu Y., Zhao Q., Ma Q., Guo J. Environmental pollution by antibiotic resistance genes in poultry farms and ways to prevent it: a systematic review. *Poult Sci.* 2025 Mar;104(3):104858. doi: 10.1016/j.psj.2025.104858. Published on January 25, 2025. PMID: 39874786
6. Hein ST, Prathan R, Srisanga S, Muenhor D, Wongsurawat T, Jenjaroenpun P, Tummaruk P and Chuanchuen R (2024) Metagenomic insights into isolable bacterial communities and antimicrobial resistance in airborne dust from pig farms. *Front. Vet. Sci.* 11:1362011. doi: 10.3389/fvets.2024.1362011
7. Ильясов О.Р., Неверова О.П., Зуева Г.В., Шаравьев П.В. Санитарно-гигиеническая проблема загрязнения окружающей среды отходами животноводческих и птицеводческих комплексов. *Вестник ЮурГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии*, 2017, 5(3): 59-65.
8. В.И. Фисинин, В.И. Трухачев, И.П. Салеева, В.Ю. Морозов, Е.В. Журавчук, Р.О. Колесников, А.В. Иванов. Микробиологические риски в промышленном птицеводстве и животноводстве. *Сельскохозяйственная биология*, 2018, том 53, 6, с. 1120-1130 doi: 10.15389/agrobiology.2018.6.1120 rus.
9. С.А. Худайназаров, А.А. Шамурадов. Методы оценки биоразнообразия. *Молодой ученый*. 2023.№ 17 (464). С. 163-166.
10. И.В. Соловьева, А.Н. Варичев, И.В. Белова, А.Г. Точилина, Д.Б. Гелашвили, Г.И. Григорьева, В.А. Жирнов, И.Н. Калашников. Синэкологический анализ микробиоценозов крупных птицеводческих хозяйств. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, т. 20, № 5(3), 2018.
11. Мазилев С.И., Райкова С.В., Комлева Н.Е., Скворцова Н.В. Состояние респираторной системы работников птицеводства. *Гигиена и санитария*.2024; 103(11): 1286–1291. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-11-1286-1291>
<https://elibrary.ru/qkcgyo>.
12. . Гизатуллина Л.Г., Масягутова Л.М., Бакиров А.Б. Этиологическое значение и антибиотикочувствительность отдельных штаммов микроорганизмов, выделенных у работников агропромышленного комплекса. *Медицина труда и экологии человека*. Сетевое издание; 2019; 2.
13. Масягутова Л.М., Гизатуллина Л.Г. Состояние микробиоты кожи и слизистых оболочек у работников как критерий адаптации к факторам производства. *Гигиена и санитария*.2019; 98(9) стр. 1015-1020.
14. Масягутова Л.М., Гизатуллина Л.Г. К вопросу о биологическом факторе рабочей среды. *Охрана труда и техника безопасности в сельском хозяйстве*. 2020; 4(194) стр.5-11.

15. Mbehang Nguema PP, Onanga R, Moussavou Boussougou MN, et al. Antimicrobial use in poultry and *Candida* carriage. *J Mycol Med*. 2020;30(3):100991. PMID: 32461988.
16. Tokarska-Rodak M, Weiner M. *Candida* species w miejscu pracy: element mikrobioty, patogen oportunistyczny oraz czynnik zoonotyczny. *Med Pr*. 2023 Dec 15;74(5):425-433. doi: 10.13075/mp.5893.01412. Epub 2023 Oct 23. PMID: 38104342.
17. Weyrich LS, Dixit S, Farrer AG, et al. The human respiratory microbiome. *Curr Opin Microbiol*. 2015;25:68-75. PMID: 26264353.
18. Parmar N, Singh R, Tyagi A, Kaur S, Malik H, Aulakh RS, Arora AK, Gill JPS. Устойчивость к противомикробным препаратам и геномные данные об изолятах *Enterococcus faecalis* от бройлеров и их работников в Пенджабе, Индия. *Foodborne Pathog Dis*. 2026 Jun;23(6):373-383. doi: 10.1089/fpd.2024.0151. Опубликовано 23 апреля 2025 г. PMID: 40266918.
19. Пармар Н., Сингх Р., Тьяги А., Каур С., Арора А. К., Гилл Дж. П. С. Фенотипическая и геномная характеристика устойчивости к противомикробным препаратам у ванкомицин-резистентного *Enterococcus faecalis*. *Mol Biol Rep*. 2026 Apr 16;53(1):617. doi: 10.1007/s11033-026-11786-y. PMID: 41989674.
20. Бабунова В.С., Осипова И.С., Попов П.А., Арсеньева Л.В. Микробиологический метод определения остаточных количеств антибиотиков в мясе цыплят-бройлеров и продуктах птицеводства // Российский журнал «Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии». 2026. № 1 (57). С. 46–52. DOI: 10.36871/vet.san.hyg.ecol.202601006 EDN: BDDXND
21. Волков Р.А., Галиуллин А.К., Волков А.Х., Агольцов В.А. Влияние антибиотиков на ветеринарно-санитарные качества мяса птиц // Научная жизнь. 2023. Т. 18. № 1 (127). С. 148-155. DOI:10.35679/1991-9476-2023-18-1-148-155.
22. Музафарова А.Р., Гизатуллина Л.Г., Масягутова Л.М., Кудакаева Р.Х., Аралбаев Х.Ф. Проблемы развития антибиотикорезистентности в сельском хозяйстве в современном мире. Материалы XIII Всероссийской научно-практической интернет-конференции молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора с международным участием «Гигиена, окружающая среда».
23. Borralho J, Handem S, Lança J, Ferreira B, Candeias C, Henriques AO, Hiller NL, Valente C, Sá-Leão R. 2025. Подавление роста пневмококков и образования биопленок изолятами *Streptococcus mitis* и *Streptococcus oralis* человека. *Appl Environ Microbiol* 91: e01336-24. <https://doi.org/10.1128/aem.01336-24>.
24. Borralho João, João Lança, Joana Bryton, Wilson Antunes, Raquel Sá-Leão bioRxiv. Бактериоцины *Streptococcus mitis* способствуют контактно-зависимому лизису *S. pneumoniae*, способствуя трансформации в многовидовых средах. 2025. 08.25.672098; doi:<https://doi.org/10.1101/2025.08.25.672098>.

25. Rafael Custodio, Arryn Johnson, Guanyu Liu, Christoph M. Tang, Rachel M. Exley. Commensal *Neisseria cinerea* inhibits the development of *Neisseria meningitidis* microcolonies and reduces the pathogen's colonization of epithelial cells. *PLoS Pathogens*. March, 2020.

References:

1. Hofman A.A., Lysko S.B., Zadorozhnaya M.V., Suntsova O.A. Species composition of microflora isolated from poultry. *Sibirskiy vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 2025; 55(2):101-108. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2025-2-12>.
2. Glinkina I.M., Kashirina N.A., Baylova N.V., Maslova G.M. Production of poultry products in Russia. In the collection: Production and processing of agricultural products. Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference. Voronezh, 2023. - C.- 177-184.
3. Luiken R.E.C., Van Gompel L., Bossers A. et al. Farm dust resistomes and bacterial microbiomes in European poultry and pig farms. *Environment International*. July 29th 2020, 10.1016/j.envint.2020.105971.
4. Sendron F., Persicilli C., Senchuk G., Perini F., Lasagna E., Cassandro M., Penasa M. Genet Sel Evol. Local Italian Chicken Breeds: A Comparative Analysis of Biodiversity on a Global Scale. 2025 Jun 10; 57(1):30. doi: 10.1186/s12711-025-00980-4. PMID: 40495128.
5. Chen Y., Liu Y., Zhao Q., Ma Q., Guo J. Environmental pollution by antibiotic resistance genes in poultry farms and ways to prevent it: a systematic review. *Poult Sci*. 2025 Mar; 104(3):104858. doi: 10.1016/j.psj.2025.104858. Published on January 25, 2025. PMID: 39874786.
6. Hein ST, Prathan R, Srisanga S, Muenhor D, Wongsurawat T, Jenjaroenpun P, Tummaruk P and Chuanchuen R (2024) Metagenomic insights into isolable bacterial communities and antimicrobial resistance in airborne dust from pig farms. *Front. Vet. Sci*. 11:1362011. doi: 10.3389/fvets.2024.1362011.
7. Ilyasov O.R., Neverova O.P., Zueva G.V., Sharaviev P.V. Sanitary and hygienic problem of environmental pollution by waste from livestock and poultry farms. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*, 2017, 5(3): 59-65.
8. Fisinin V.I., Trukhachev V.I., Saleeva I.P., Morozov V.Y., Zhuravchuk E.V., Kolesnikov R.O., Ivanov A.V. Microbiological risks in industrial poultry and livestock farming. *Sel'skokhozyaystvennaya Biologiya*. 2018; 53(6) :1120-1130. doi: 10.15389/agrobiol.2018.6.1120 rus.

9. Khudaynazarov S.A., Shamuradov A.A. Methods for assessing biodiversity. *Molodoy Uchenyy*. 2023;(17):163-166.
10. Solovyova I.V., Varichev A.N., Belova I.V., Tochilina A.G., Gelashvili D.B., Grigorieva G.I., Zhirnov V.A., Kalashnikov I.N. Synecological analysis of microbiocenoses in large poultry farms. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk*. 2018; 20, № 5(3).
11. Mazilov S.I., Raikova S.V., Komleva N.E., Skvortsova N.V. Bronchopulmonary pathology among egg poultry workers. *Hygiene and Sanitation*. 2024; 103(11): 1286–1291.<https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-11-1286-1291>
<https://elibrary.ru/qkcggyo>
12. Gizatullina L.G., Masyagutova L.M., Bakirov A.B. Etiological significance and antibiotic sensitivity of certain strains of microorganisms isolated from workers in the agro-industrial complex. *Medsina truda i ekologiya cheloveka [Occupational Health and Human Ecology]*; 2019; 2.
13. Gimranova G.G., Masyagutova L.M., Gizatullina L.G. The state of microbiota of the skin and mucous membranes of workers as an adaptation criterion to occupational factors. *Hygiene and Sanitation*. 2019;98(9):1015-1020.
14. Masyagutova L.M., Gizatullina L.G. On the issue of the biological factor in the working environment. *Okhrana truda i tekhnika bezopasnosti v sel'skom khozyaystve*. 2020;4(194):5-11.
15. Mbehang Nguema PP, Onanga R, Moussavou Boussougou MN, et al. Antimicrobial use in poultry and *Candida* carriage. *J Mycol Med*. 2020;30(3):100991. PMID: 32461988.
16. Tokarska-Rodak M, Weiner M. *Candida* species w miejscu pracy: element mikrobioty, patogen oportunistyczny oraz czynnik zoonotyczny. *Med Pr*. 2023 Dec 15;74(5):425-433. doi: 10.13075/mp.5893.01412. Epub 2023 Oct 23. PMID: 38104342.
17. Weyrich LS, Dixit S, Farrer AG, et al. The human respiratory microbiome. *Curr Opin Microbiol*. 2015; 25:68-75. PMID: 26264353
18. Parmar N, Singh R, Tyagi A, Kaur S, Malik H, Aulakh RS, Arora AK, Gill JPS. Antimicrobial resistance and genomic insights into *Enterococcus faecalis* isolates from broilers and their workers in Punjab, India. *Foodborne Pathog Dis*. 2026 Jun;23(6):373-383. doi:10.1089/fpd.2024.0151. Published April 23, 2025. PMID: 40266918.
19. Parmar N, Singh R, Tyagi A, Kaur S, Arora AK, Gill JPS. Phenotypic and genomic characterization of antimicrobial resistance in vancomycin-resistant *Enterococcus faecalis* *Mol Biol Rep*. 2026 Apr 16;53(1):617. doi: 10.1007/s11033-026-11786-y. PMID: 41989674.
20. Babunova V.S., Osipova I.S., Popov P.A., Arsenyeva L.V. Microbiological method for determining residual amounts of antibiotics in broiler chicken meat and poultry products.

- Russian Journal "Problems of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology 2026. № 1 (57). С. 46–52. DOI: 10.36871/vet.san.hyг.ecol.202601006 EDN: BDDXND.
21. Volkov R.A., Galiullin A.K., Volkov A.Kh., Agoltsov V.A. Effect of antibiotics on veterinary and sanitary qualities of poultry meat. Scientific Life. 2023. T. 18. № 1 (127). С. 148-155. DOI:10.35679/1991-9476-2023-18-1-148-155.
22. Muzafarova A.R., Gizatullina L.G., Masyagutova L.M., Kudakaeva R.Kh., Aralbayev Kh.F. Problems of the development of antibiotic resistance in agriculture in the modern world. In: Materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Internet Conference of Young Scientists and Specialists of Rospotrebnadzor with International Participation "Hygiene, Environment and Health Risks".
23. Borralho J, Handem S, Lança J, Ferreira B, Candeias C, Henriques AO, Hiller NL, Valente C, Sá-Leão R. 2025. Suppression of pneumococcal growth and biofilm formation by human *Streptococcus mitis* and *Streptococcus oralis* isolates. Appl Environ Microbiol 91: e01336-24. <https://doi.org/10.1128/aem.01336-24>.
24. Borralho João, João Lança, Joana Bryton, Wilson Antunes, Raquel Sá-Leão bioRxiv. *Streptococcus mitis* bacteriocins promote contact-dependent lysis of *S. pneumoniae*, facilitating transformation in multispecies environments. 2025. 08.25.672098; doi:<https://doi.org/10.1101/2025.08.25.672098>.
25. Rafael Custodio, Arryn Johnson, Guanyu Liu, Christoph M. Tang, Rachel M. Exley. Commensal *Neisseria cinerea* inhibits the development of *Neisseria meningitidis* microcolonies and reduces the pathogen's colonization of epithelial cells. PLoS Pathogens. March, 2020.

Информация об авторах

Гизатуллина Лилия Галиевна – биолог иммуно-бактериологической лаборатории ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека» (450106, г.Уфа, e-mail: Instityt.Ufa@mail.ru; тел.: +7 (917) 454-17-32, ORCID iD: 0000-0001-6593-2704).

Бакиров Ахат Бариевич – советник директора ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», доктор медицинских наук, профессор, академик Академии наук Республики Башкортостан, заведующий кафедры терапии и профессиональных болезней с курсом ИДПО ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет» Минздрава России, 450097, г.Уфа, e-mail: fbun@uniimtech.ru., ORCID iD: 0000-0003-3510-2595.

Масягутова Ляйля Марселевна - доктор медицинских наук, главный научный сотрудник отдела медицины труда ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», 450106, Россия, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Степана

Кувыкина, д. 94, e-mail: kdl.ufa@rambler.ru тел.: +79373604922, ORCID iD: 0000-0003-0195-8862.

Калимуллина Светлана Наилевна - врач бактериолог иммуно-бактериологической лаборатории ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», 450106, г.Уфа, e-mail: sabitova_svetik@mail.ru; тел.: +7 (962)544-17-30, ORCID iD: 0009-0004-0862-8553.

Ахметова Гульшат Назифовна - заведующий иммуно-бактериологической лаборатории ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», 450106, г.Уфа, тел.: +7 (927)964-38-74, ORCID iD: 0009-0004-3957-7533.

Зайдуллин Искандер Ильдарович - заведующий отделом медицины труда ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», (450106, г.Уфа, e-mail: Instityt.Ufa@mail.ru; тел.: +7 (987)259-45-07, ORCID iD: 0000-0002-6031-5683.

Чудновец Гузель Маратовна – врач ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», 450106, г.Уфа, e-mail: Instityt.Ufa@mail.ru; тел.: +7 (903)353-73-51, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5807-2037>.

Author information

Gizatullina Liliya Galievna is a biologist at the Immuno-Bacteriological Laboratory of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology ,450106, Ufa, e-mail: Instityt.Ufa@mail.ru; phone: +7 (917) 454-17-32, ORCID iD: 0000-0001-6593-2704.

Akhat Bakirov, Advisor to the Director of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Doctor of Medical Sciences, Professor, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, Head of the Department of Therapy and Occupational Diseases with a course in IDPO Bashkir State University of the Ministry of Health of the Russian Federation, 450097, Ufa, e-mail: fbun@uniimtech.ru, ORCID iD: 0000-0003-3510-2595.

Masyagutova Lyailya Marselevna - MD, Chief Researcher, Department of Occupational Medicine, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, 94 Stepan Kuvykin str., 450106, Russia, Republic of Bashkortostan; e-mail: kdl.ufa@rambler.ru Phone: +79373604922, ORCID iD: 0000-0003-0195-8862.

Kalimullina Svetlana Nailevna - bacteriologist at the Immunobacteriological Laboratory of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, 450106, e-mail: sabitova_svetik@mail.ru; tel.: +7 (962)544-17-30, ORCID iD: 0009-0004-0862-8553.

Akhmetova Gulshat Nazifovna - Head of the Immunobacteriological Laboratory of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology», Ufa, 450106, tel.: +7 (927)964-38-74, ORCID iD:0009-0004-3957-7533.

Zaydullin Iskander Ildarovich - Head of the Department of Occupational Medicine at the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology 450106, Ufa, e-mail: Instityt.Ufa@ mail.ru; phone: +7 (987)259-45-07, ORCID iD: 0000-0002-6031-5683.

Chudnovets Guzel Maratovna is a doctor at the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology 450106, Ufa, e-mail: Instityt.Ufa@ mail.ru; phone: +7 (903)353-73-51, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5807-2037>.

Поступила/Received: 06.07.2026

Принята в печать/Accepted: 27.07.2026

УДК: 613.6:621.317.7

КОМПЛЕКСНАЯ ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ТРУДА И ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ПЕРСОНАЛА ОТДЕЛЕНИЙ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

Бушманов А.Ю., Титова Н.А., Каримова Д.Ю.

ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации - Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И.Бурназяна» ФМБА России, Москва, Россия

Персонал отделений магнитно-резонансной томографии (МРТ) подвергается сочетанному воздействию физических факторов производственной среды, что определяет необходимость комплексной гигиенической оценки условий труда и изучения функционального состояния работников.

Цель. Провести комплексную гигиеническую оценку условий труда и изучить функциональное состояние персонала, работающего с аппаратами МРТ.

Материалы и методы. На рабочих местах врачей-рентгенологов и рентгенолаборантов отделений МРТ трёх клинических больниц проведены инструментальные измерения уровней постоянного магнитного поля, эквивалентного уровня звука и освещённости. Основную группу составили 25 работников отделений МРТ, контрольную – 25 медицинских работников, профессионально не контактировавших с физическими факторами МРТ. Функциональное состояние оценивали с помощью методики САН, цветового теста Люшера, индекса функциональных изменений сердечно-сосудистой системы и критической частоты слияния световых мельканий.

Результаты. Основным неблагоприятным фактором производственной среды при эксплуатации МРТ являлось постоянное магнитное поле с напряжённостью до 450 мТл в зоне обслуживания томографа, что соответствовало вредным условиям труда классов 3.1–3.2. По сравнению с контрольной группой у работников МРТ отмечались более низкие показатели самочувствия ($3,8 \pm 0,4$ балла) и активности ($3,5 \pm 0,5$ балла), повышение индекса функциональных изменений до $2,45 \pm 0,30$, отражавшее напряжение адаптационных механизмов, а также снижение критической частоты слияния световых мельканий на 12%. Усиление воздействия постоянного магнитного поля сопровождалось увеличением индекса функциональных изменений ($r = 0,52$; $p < 0,05$) и снижением критической частоты слияния световых мельканий ($r = -0,49$; $p < 0,05$) и показателя активности по методике САН ($r = -0,46$; $p < 0,05$).

Ограничения исследования. Одномоментный дизайн исследования не позволяет установить причинно-следственные связи. В анализе не учитывались индивидуальные особенности продолжительности профессионального стажа работников.

Выводы. Условия труда персонала отделений МРТ соответствуют вредному классу 3.1–3.2. У работников выявлены признаки напряжения механизмов адаптации сердечно-сосудистой системы, снижения субъективной активности и функциональной лабильности зрительного анализатора. Расчётный профессиональный риск составил 8,75 и был отнесён к неприемлемой категории. Профилактические мероприятия должны предусматривать ограничение продолжительности непрерывного пребывания в зонах повышенного постоянного магнитного поля и рациональную регламентацию режима труда и отдыха.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография; постоянное магнитное поле; гигиена труда; условия труда; функциональное состояние; профессиональный риск; медицинский персонал

Соблюдение этических стандартов: исследование одобрено локальным этическим комитетом Медико-биологического университета инноваций и непрерывного образования ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России (протокол № 127 от 17.10.2025). Все участники подписали информированное согласие.

Использование инструментов искусственного интеллекта: авторы заявляют, что при подготовке настоящей рукописи системы искусственного интеллекта не применялись.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Для цитирования: Бушманов А.Ю., Титова Н.А., Каримова Д.Ю. Комплексная гигиеническая оценка условий труда и функциональное состояние персонала отделений магнитно-резонансной томографии. Медицина труда и экология человека. 2026; 3:148-168.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10308>

Для корреспонденции: Дания Юсуфовна Каримова, e-mail: danika_karimova@mail.ru

COMPREHENSIVE HYGIENIC ASSESSMENT OF WORKING CONDITIONS AND FUNCTIONAL STATE OF MAGNETIC RESONANCE IMAGING DEPARTMENT PERSONNEL

Bushmanov A.Yu., Titova N.A., Karimova D.Yu.

State Research Cnter – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency (SRC – FMBC), Moscow, Russia

Magnetic resonance imaging (MRI) department personnel are occupationally exposed to a combination of physical workplace factors, which necessitates a comprehensive occupational hygiene assessment and an evaluation of workers' functional status.

The purpose of the study. To conduct a comprehensive occupational hygiene assessment and evaluate the functional status of personnel working with MRI systems.

Materials and methods. Instrumental measurements of static magnetic field exposure, equivalent continuous sound level, and illuminance were performed at the workplaces of radiologists and radiographers in MRI departments of three clinical hospitals. The exposed group comprised 25 MRI department employees, whereas the control group included 25 healthcare workers without occupational exposure to MRI-related physical factors. Functional status was assessed using the Well-Being, Activity, and Mood questionnaire, the Lüscher color test, the functional change index of the cardiovascular system, and critical flicker fusion frequency.

Results. The principal occupational hazard was the static magnetic field, reaching 450 mT in the scanner service area, corresponding to working conditions class 3.2. Compared with the control group, MRI personnel demonstrated significantly lower well-being (3.8 ± 0.4) and activity (3.5 ± 0.5) scores, an increase in the Index of Functional Changes to 2.45 ± 0.30 , indicating strain of adaptation mechanisms, and a 12% reduction in the critical flicker fusion frequency. Static magnetic field exposure was positively correlated with the Index of Functional Changes ($r = 0.52$; $p < 0.05$) and negatively correlated with the critical flicker fusion frequency ($r = -0.49$; $p < 0.05$) and the activity score of the SAM questionnaire ($r = -0.46$; $p < 0.05$).

Study limitations. The cross-sectional study design precludes establishing causal relationships. Individual differences in duration of occupational employment were not included in the analysis.

Conclusion. The occupational conditions of MRI department personnel were classified as harmful, corresponding to classes 3.1–3.2. The employees demonstrated strain of cardiovascular adaptation mechanisms, reduced self-reported activity, and decreased functional lability of the visual analyzer. The calculated occupational risk score was 8.75

and was classified as unacceptable. Preventive measures should include limiting the duration of continuous exposure in areas with elevated static magnetic field levels and establishing an appropriate work–rest schedule.

Keywords: magnetic resonance imaging; static magnetic field; occupational hygiene; occupational conditions; functional status; occupational risk; healthcare personnel

Compliance with ethical standards: the study was approved by the local ethics committee of the Medical and Biological University of Innovation and Continuing Education of the Federal State Budgetary Institution A.I. Burnazyan Federal Medical and Biological Agency of Russia (protocol No. 127 dated 17.10.2025). All participants signed an informed consent form.

Use of artificial intelligence tools: The authors declare that no artificial intelligence systems were used in the preparation of this manuscript.

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

Funding. This study was not supported by any external funding.

For citation: Bushmanov A.Yu., Titova N.A., Karimova D.Yu. Comprehensive hygienic assessment of working conditions and functional state of magnetic resonance imaging department personnel. *Occupational Health and Human Ecology*. 2026; 3:148-168.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10308>

For correspondence: Daniia Y. Karimova, e-mail: danika_karimova@mail.ru

Широкое внедрение магнитно-резонансной томографии (МРТ) в клиническую диагностику создаёт новые вызовы в области охраны здоровья медицинского персонала, осуществляющего эксплуатацию и обслуживание данной аппаратуры [1]. Персонал отделений МРТ относится к категории работников, подверженных хроническому профессиональному воздействию уникального комплекса физических факторов. Ведущим компонентом этой производственной среды является статическое магнитное поле высокой напряжённости. Сопутствующими вредными факторами выступают шум от систем охлаждения и вентиляции, достигающий уровней 65–100 дБА, а также специфическая визуальная среда, связанная с работой за мониторами в условиях затемнённого помещения [2]. Несмотря на признанную безопасность диагностической процедуры для пациентов, вопрос о гигиенической оценке условий труда для операторов остаётся

недостаточно изученным. Хотя потенциальное биологическое действие сильных магнитных полей исследуется, данные носят фрагментарный характер [3, 4].

Современные исследования показывают, что электромагнитная обстановка в помещениях МРТ не ограничивается воздействием постоянного магнитного поля. При перемещении работников в неоднородном рассеянном поле, особенно вблизи портала томографа, формируется изменяющееся во времени магнитное воздействие, величина которого зависит от напряжённости поля, пространственного градиента и скорости движения персонала. Инструментальные и расчётные исследования подтверждают, что наиболее высокие уровни профессионального воздействия возникают при укладке и извлечении пациента, установке оборудования и выполнении манипуляций непосредственно у входа в тоннель томографа; при использовании систем 3,0 и 7,0 Тл эти значения существенно возрастают [5, 6]. Дополнительными компонентами электромагнитной среды являются быстро переключаемые градиентные магнитные поля и радиочастотные электромагнитные поля, генерируемые во время сканирования. Хотя при стандартной диагностической работе персонал преимущественно находится вне активной зоны радиочастотной катушки, возможность его воздействия сохраняется при интервенционных исследованиях, сопровождении пациентов и других процедурах, требующих присутствия сотрудника в помещении во время получения изображения [7]. По данным эпидемиологических исследований, работа вблизи высокопольных МРТ-систем ассоциируется с более частым возникновением головокружения, ощущения движения, тошноты, металлического вкуса, головной боли и нарушений концентрации внимания; вероятность подобных симптомов увеличивается при работе с томографами напряжённостью 3,0 Тл и выше [8, 9]. Вместе с тем современные обзоры подчёркивают, что сведения о последствиях длительного сочетанного воздействия постоянного, градиентного и радиочастотного полей остаются ограниченными, а оценка профессионального риска должна учитывать не только номинальную напряжённость томографа, но также пространственное распределение поля, характер рабочих операций, продолжительность пребывания у портала и скорость перемещения персонала [10].

Ряд работ указывает на возможное влияние на нейровегетативный статус и сердечно-сосудистую систему [11, 12]. Однако эти исследования, как правило, не проводят комплексной оценки всех значимых факторов среды и их интегрального эффекта. В отечественной гигиене труда данная проблема требует внимания в свете действующей системы специальной оценки условий труда (СОУТ).

Существующие нормативные документы содержат критерии оценки постоянного магнитного поля и шума, однако их практическое применение к специфическим условиям работы в МРТ-отделениях нуждается в научном обосновании [13, 14]. Отсутствие комплексных исследований, объединяющих инструментальную оценку факторов с многомерным анализом функционального состояния персонала, создаёт существенный пробел [15]. Этот пробел затрудняет объективную классификацию условий труда, расчёт профессионального риска и разработку профилактических мероприятий [9, 16, 17].

Цель исследования – провести комплексную гигиеническую оценку условий труда и изучить особенности функционального состояния персонала, работающего на аппаратах МРТ, для разработки мер профилактики.

Материалы и методы

Дизайн и база исследования. Настоящее одномоментное гигиеническое и клинико-физиологическое исследование проведено в 2023–2024 гг. на базе трёх многопрофильных стационаров г. Москвы, оснащённых закрытыми томографами с напряжённостью магнитного поля 1,5 Тл ($n=2$) и 3,0 Тл ($n=1$).

Исследуемые группы. Основную группу (ОГ) составили 25 сотрудников отделений МРТ: врачи-рентгенологи ($n=12$) и рентгенолаборанты ($n=13$). Средний возраст – $38,5 \pm 7,2$ года, средний стаж – $8,3 \pm 4,1$ года. Контрольную группу (КГ) сформировали из 25 медицинских работников терапевтических отделений, сопоставимых по возрасту ($37,8 \pm 6,9$ лет) и полу, не контактирующих с факторами МРТ. Все участники подписали информированное согласие.

Методы гигиенической оценки условий труда. Инструментальные измерения проводились в течение рабочей смены.

1. Оценка постоянного магнитного поля (ПМП): измерение тесламетром ТЕСЛА-МЕТР ТМ-1-М (ООО «Приборы», Россия). Оценка класса условий труда по Руководству Р 2.2.2006-05 [12].
2. Оценка шума: измерение эквивалентного уровня звука шумомером-анализатором ОКТАВА-110А (ООО «Октава-ЭлектронДизайн», Россия). Классификация по СанПиН 1.2.3685-21 [4].
3. Оценка освещённости: измерения люксметром-яркомером ТКА-Люкс/Ярк (ООО «ТКА-ПКП», Россия).

Методы оценки функционального состояния.

1. Самооценка состояния: стандартизированная методика оперативной оценки самочувствия, активности и настроения (САН).
2. Оценка психоэмоционального напряжения: восьмицветовой тест Люшера (вегетативный коэффициент).
3. Функциональное состояние сердечно-сосудистой системы оценивали с использованием индекса функциональных изменений (ИФИ), рассчитанного по методике Р.М. Баевского [18].
4. Оценка функционального состояния центральной нервной системы (ЦНС): определение критической частоты слияния световых мельканий (КЧСМ).
5. Расчёт профессионального риска: интегральная оценка с использованием вероятностного подхода (методика Р 2.2.1766-03) [3, 14].

Статистические методы. Обработка данных выполнена в IBM SPSS Statistics 26.0. Использованы критерии Шапиро-Уилка, Стьюдента, Манна-Уитни, корреляционный анализ (Пирсон, Спирмен). Уровень значимости $p < 0,05$.

Результаты. Обязанности персонала МРТ различались по характеру выполняемой работы и месту её выполнения. Врачи-рентгенологи в основном работали в пультной за диагностическими мониторами, тогда как рентгенолаборанты проводили подготовку и укладку пациентов, замену радиочастотных катушек и обслуживание томографа в процедурном помещении. Поэтому интенсивность воздействия производственных факторов определялась как особенностями выполняемых операций, так и расстоянием до основного магнита.

В отличие от других производственных факторов, постоянное магнитное поле сохранялось независимо от проведения сканирования. Его напряжённость определялась расстоянием до томографа: максимальные значения регистрировались у портала, а по мере удаления быстро уменьшались. Поэтому наиболее интенсивное воздействие отмечалось при укладке пациентов, замене радиочастотных катушек и работе у входа в тоннель.

Гигиеническая оценка производственной среды

Результаты инструментальной оценки факторов производственной среды представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты инструментальной оценки факторов производственной среды на рабочих местах персонала МРТ

Table 1. Results of instrumental assessment of occupational environment factors at MRI staff workstations

Фактор	Точка измерения	Измеренный диапазон	Среднее значение или Me [Q1; Q3]	Гигиенический норматив	Класс условий труда
Постоянное магнитное поле	Пультовая	0,8–1,5 мТл	1,1±0,2 мТл	80 мТл*	2
Постоянное магнитное поле	Зона подготовки пациента, 0,5 м от аппарата	85–215 мТл	145 [110; 180] мТл	80 мТл*	3.1
Постоянное магнитное поле	Вход в тоннель, плоскость портала	320–450 мТл	385 [350; 410] мТл	80 мТл*	3.2
Эквивалентный уровень звука	Пультовая	62–68 дБА	65,2±1,8 дБА	80 дБА	2
Эквивалентный уровень звука	Помещение с томографом	68–73 дБА	70,5 [68; 72] дБА	80 дБА	2
Искусственная освещённость	Рабочая поверхность в пультовой	280–350 лк	310±25 лк	300–500 лк	2
Искусственная освещённость	Рабочая зона диагностического монитора	180–250 лк	210 [190; 230] лк	200–300 лк	2

Примечание: ПМП — постоянное магнитное поле; Me — медиана; Q1 и Q3 — первый и третий квартили. * Оценка выполнена согласно Руководству Р 2.2.2006-05 [6].

Note: CMP – constant magnetic field; Me – median; Q1 and Q3 – first and third quartiles. * Assessment performed in accordance with Guideline R 2.2.2006-05 [6].

В пультовой уровень постоянного магнитного поля находился в пределах 0,8–1,5 мТл, составляя в среднем $1,1 \pm 0,2$ мТл. Полученные значения не превышали действующих гигиенических нормативов. Поэтому работа в пультовой не определяла класс условий труда по фактору воздействия постоянного магнитного поля.

В зоне подготовки пациента на расстоянии 0,5 м от томографа магнитная индукция изменялась от 85 до 215 мТл, а медиана составляла 145 [110; 180] мТл. Превышение норматива достигало 2,7 раза, что соответствовало вредным условиям труда класса 3.1. Наиболее высокие показатели зарегистрированы в плоскости портала: от 320 до 450 мТл при медиане 385 [350; 410] мТл. Максимальное значение превышало норматив в 5,6 раза, поэтому условия труда в этой рабочей зоне были отнесены к классу 3.2.

Зарегистрированная неоднородность поля согласуется с физическими особенностями МРТ-системы: интенсивность рассеянного магнитного поля закономерно возрастает по мере приближения к изоцентру магнита. В исследованиях профессиональной экспозиции также показано, что наиболее высокие уровни воздействия регистрируются при укладке и извлечении пациента, установке оборудования и выполнении манипуляций непосредственно около портала томографа [5, 10]. При этом оценка условий труда не должна ограничиваться измерением на постоянном рабочем месте, поскольку кратковременные операции вблизи магнита многократно повторяются в течение смены.

Наибольшему воздействию подвергаются рентгенолаборанты, которые чаще врачей входят в процедурное помещение, осуществляют позиционирование пациентов и работают с приёмными катушками. В расширенной выборке диссертационного исследования вредные классы условий труда по уровню ПМП были установлены у 74,5% работников отделений МРТ, в том числе у 90,0% рентгенолаборантов и 52,4% врачей-рентгенологов. Это подтверждает, что профессиональная экспозиция определяется не только напряжённостью томографа, но и содержанием трудовых операций.

Дополнительное значение имеет движение работника в пространственно неоднородном постоянном магнитном поле. При изменении положения тела относительно магнита возникает переменное во времени воздействие, величина

которого зависит от пространственного градиента поля и скорости перемещения. Поэтому быстрые движения непосредственно у портала могут сопровождаться транзиторными ощущениями головокружения, неустойчивости, тошноты или металлического вкуса, описанными у персонала высокопольных МРТ-систем [5, 10, 18]. В настоящем исследовании индивидуальная дозиметрия изменяющегося во времени магнитного воздействия не проводилась, поэтому его самостоятельный вклад в функциональные изменения не оценивали.

Эквивалентный уровень звука в пультовой составлял 62–68 дБА, в среднем $65,2 \pm 1,8$ дБА. В помещении с томографом он повышался до 68–73 дБА, медиана – 70,5 [68; 72] дБА. Различия между рабочими зонами были связаны с работой градиентных катушек, систем охлаждения и вентиляции. Вместе с тем полученные значения не превышали указанного в таблице гигиенического норматива 80 дБА и соответствовали допустимому классу условий труда. Измерения проводились в рабочих зонах персонала и не характеризовали акустическую нагрузку внутри тоннеля томографа. При выполнении отдельных импульсных последовательностей уровень шума в этой зоне может значительно возрастать.

Освещённость рабочей поверхности в пультовой составляла 280–350 лк (в среднем 310 ± 25 лк), в зоне диагностического монитора – 180–250 лк, медиана 210 [190; 230] лк. В целом показатели соответствовали допустимым значениям и классу условий труда 2, хотя на отдельных рабочих местах освещённость была ниже рекомендуемой. При длительной работе с диагностическими изображениями такие локальные отклонения могут дополнительно повышать зрительную нагрузку.

Несмотря на низкие уровни ПМП в пультовой, общая оценка условий труда определялась работой у томографа. Наибольшее воздействие отмечалось во время подготовки пациента и выполнения манипуляций у портала, поэтому именно эти операции формировали вредные условия труда класса 3.2.

Функциональное состояние персонала

Результаты оценки функционального состояния персонала МРТ и контрольной группы представлены в таблице 2.

Таблица 2. Показатели функционального состояния персонала МРТ и контрольной группы

Table 2. Indicators of the functional state of MRI personnel and the control group

Показатель	Основная группа, n=25	Контрольная группа, n=25	p
Самочувствие по методике САН, баллы	3,8±0,4	5,1±0,3	<0,001
Активность по методике САН, баллы	3,5±0,5	4,9±0,4	<0,001
Настроение по методике САН, баллы	4,1±0,6	5,0±0,5	<0,01
Вегетативный коэффициент теста Люшера	1,05 [0,98; 1,15]	0,92 [0,85; 0,97]	<0,01*
Индекс функциональных изменений, баллы	2,45±0,30	1,85±0,20	<0,001
Критическая частота слияния световых мельканий, Гц	35,2±2,1	40,0±1,8	<0,001

Примечание: данные представлены как $M \pm SD$ или $Me [Q1; Q3]$. САН – самочувствие, активность, настроение. * Для сравнения применён U-критерий Манна–Уитни; для остальных показателей – t-критерий Стьюдента.

Note: data are presented as $M \pm SD$ or $Me [Q1; Q3]$. SAN – well-being, activity, mood.

* The Mann–Whitney U test was used for comparison; Student's t-test was used for the other indicators.

По методике САН у персонала МРТ выявлено статистически значимое снижение всех трёх компонентов субъективного функционального состояния. Средний показатель самочувствия составлял 3,8±0,4 балла против 5,1±0,3 балла в контрольной группе, активность – 3,5±0,5 против 4,9±0,4 балла, настроение – 4,1±0,6 против 5,0±0,5 балла. Наиболее выраженные межгрупповые различия установлены по самочувствию и активности. Полученные результаты отражают снижение текущей работоспособности и субъективного функционального тонуса персонала МРТ.

У персонала МРТ вегетативный коэффициент по тесту Люшера был выше, чем в контроле: 1,05 [0,98; 1,15] против 0,92 [0,85; 0,97] ($p < 0,01$). Различие отражало более выраженное психовегетативное напряжение, однако не могло быть однозначно

связано с магнитным полем, поскольку на показатель влияют и другие особенности профессиональной нагрузки.

У работников МРТ индекс функциональных изменений достигал $2,45 \pm 0,30$ балла, тогда как в контрольной группе он составлял $1,85 \pm 0,20$ балла ($p < 0,001$). В основной группе показатель соответствовал напряжению механизмов адаптации, в контрольной – удовлетворительному адаптационному состоянию. Это свидетельствует о большей нагрузке на регуляторные механизмы сердечно-сосудистой системы у персонала МРТ.

Критическая частота слияния световых мельканий (КЧССМ) у персонала МРТ составляла $35,2 \pm 2,1$ Гц, в контрольной группе – $40,0 \pm 1,8$ Гц, $p < 0,001$. Снижение показателя в основной группе достигало 12,0%. КЧССМ характеризует функциональную подвижность зрительного анализатора и состояние центральных механизмов переработки зрительной информации. Поэтому выявленное различие корректнее интерпретировать как снижение функциональной лабильности зрительного анализатора и центральных регуляторных процессов, а не как неспецифический «показатель утомления ЦНС».

Полученные изменения могли формироваться под влиянием комплекса факторов. Помимо пребывания в неоднородном постоянном магнитном поле, работа персонала МРТ связана с длительной зрительной нагрузкой, высокой ответственностью, необходимостью оперативного взаимодействия с пациентами и повторяющимися перемещениями между пультным и процедурным помещением. По этой причине результаты функциональных проб характеризуют общее напряжение регуляторных систем, но не позволяют при одномоментном дизайне однозначно связать все выявленные изменения исключительно с ПМП.

Взаимосвязь уровней ПМП и функциональных показателей

Корреляционный анализ выявил статистически значимую прямую связь между уровнем постоянного магнитного поля и индексом функциональных изменений: $r = 0,52$; $p < 0,05$. Следовательно, более высокая экспозиция ПМП сопровождалась увеличением ИФИ, то есть более выраженным напряжением механизмов адаптации сердечно-сосудистой системы.

Критическая частота слияния световых мельканий умеренно снижалась по мере увеличения уровня постоянного магнитного поля ($r = -0,49$; $p < 0,05$). Такая зависимость может свидетельствовать о снижении функциональной лабильности

зрительного анализатора и процессов центральной обработки зрительной информации.

Между уровнем постоянного магнитного поля и показателем активности по методике САН также выявлена умеренная обратная связь ($r = -0,46$; $p < 0,05$): с увеличением профессиональной экспозиции субъективная активность работников снижалась. Выявленные корреляции отражают статистически значимую связь между уровнем воздействия ПМП и функциональными показателями, однако их умеренная сила и одномоментный дизайн исследования не позволяют делать выводы о причинно-следственной зависимости. Для подтверждения этих результатов необходимы проспективные исследования с персональной дозиметрией, учётом стажа и повторной оценкой показателей до и после рабочей смены.

Оценка профессионального риска

Согласно расчётам, интегральный показатель профессионального риска достиг 8,75, что соответствовало высокой (неприемлемой) категории риска [1, 14]. На итоговую оценку повлияли превышение допустимых уровней ПМП в отдельных рабочих зонах, класс условий труда и зарегистрированные функциональные изменения у персонала.

Полученные данные обосновывают необходимость организационных мер, направленных на снижение профессиональной экспозиции. К ним относятся подготовка пациента и оборудования до входа в зону магнита, сокращение времени работы у портала томографа, рациональное распределение операций между сотрудниками и ограничение непрерывного пребывания в процедурном помещении.

Дополнительное значение имеют рациональная организация рабочих мест в пультной, поддержание нормативной освещённости, регламентированные перерывы при длительной работе с диагностическими мониторами и динамическое наблюдение за функциональным состоянием персонала. Поскольку выявленные изменения не являются специфичными для одного производственного фактора, профилактическая программа должна учитывать сочетанное воздействие ПМП, зрительной, сенсорной и психоэмоциональной нагрузки.

Обсуждение. Проведённое исследование показало, что гигиеническая характеристика условий труда персонала МРТ определяется выраженной пространственной неоднородностью постоянного магнитного поля. На постоянном рабочем месте в пультовой уровень ПМП соответствовал допустимым значениям, однако при выполнении операций вблизи портала превышал норматив до 5,6 раза и формировал вредные условия труда класса 3.2. Следовательно, оценка только пультовой не отражает реальную экспозицию персонала и должна дополняться измерениями во всех зонах фактического пребывания работников.

Полученные результаты согласуются с данными исследований, в которых максимальная профессиональная экспозиция регистрировалась во время укладки пациента, установки катушек и других манипуляций около портала МРТ-системы [5, 10]. При этом интенсивность воздействия зависит от напряжённости томографа, пространственного градиента поля, траектории и скорости движения работника. Это особенно важно для рентгенолаборантов, которые чаще и дольше находятся в процедурном помещении.

У персонала МРТ выявлено одновременное снижение показателей самочувствия, активности и настроения, повышение вегетативного коэффициента, увеличение ИФИ и уменьшение КЧССМ. Такая совокупность изменений свидетельствует о напряжении механизмов адаптации, снижении функционального состояния и функциональной лабильности зрительного анализатора. Аналогичные жалобы и изменения самочувствия описывались у работников МРТ в исследованиях, посвящённых воздействию статических магнитных полей и акустической нагрузки [5, 11, 17, 18].

Вместе с тем выявленные различия следует трактовать с учётом многофакторности производственной среды. Функциональное состояние персонала определяется не только воздействием ПМП, но и организацией труда, продолжительностью работы за монитором, акустической нагрузкой, необходимостью постоянной концентрации внимания и эмоциональным взаимодействием с пациентами. Корреляции между ПМП и ИФИ, КЧССМ и активностью подтверждают наличие статистической связи, однако не позволяют полностью исключить влияние сопутствующих факторов.

Интерпретацию полученных данных следует проводить с учётом ограничений исследования. К ним относятся относительно небольшой объём выборки, одномоментный дизайн и отсутствие персональной дозиметрии магнитных полей.

Кроме того, анализ не учитывал стаж работы, напряжённость томографов и влияние градиентных и радиочастотных полей. Поэтому выявленные изменения отражают совокупное действие профессиональных факторов, а не вклад каждого из них по отдельности.

Выявленные особенности условий труда и функционального состояния персонала свидетельствуют о необходимости усиления профилактических мероприятий. В первую очередь это касается зонирования процедурного помещения по уровням магнитной индукции, ограничения времени пребывания у портала томографа, обучения безопасным алгоритмам работы и рациональной организации режима труда и отдыха. Дополнительно целесообразен регулярный контроль функционального состояния сердечно-сосудистой системы, зрительного анализатора и психофизиологических показателей работников.

Выводы:

1. Гигиеническая оценка условий труда персонала МРТ определялась преимущественно воздействием постоянного магнитного поля. В зоне подготовки пациентов установлен класс условий труда 3.1, тогда как при выполнении манипуляций у портала томографа, где магнитная индукция достигала 450 мТл и превышала допустимый уровень до 5,6 раза, – класс 3.2.
2. У работников МРТ по сравнению с контролем зарегистрированы более низкие показатели самочувствия, активности и настроения, повышение вегетативного коэффициента, увеличение индекса функциональных изменений до $2,45 \pm 0,30$ балла и снижение критической частоты слияния световых мельканий на 12%. Уровень постоянного магнитного поля был связан с увеличением индекса функциональных изменений ($r=0,52$; $p<0,05$) и уменьшением критической частоты слияния световых мельканий ($r=-0,49$; $p<0,05$) и активности по методике САН ($r=-0,46$; $p<0,05$).
3. Интегральный показатель профессионального риска достиг 8,75, что соответствовало неприемлемой категории. Для снижения профессиональной нагрузки целесообразно ограничить продолжительность работы в зонах повышенной магнитной индукции, рационально распределять операции у портала томографа, оптимизировать режим труда и отдыха и проводить регулярный контроль функционального состояния работников.

Вклад авторов:

Концепция и дизайн исследования – Бушманов А.Ю., Каримова Д.Ю.

Сбор и обработка материала – Титова Н.А.

Анализ данных – Титова Н.А.

Написание текста и оформление статьи – Титова Н.А., Каримова Д.Ю.

Редактирование – Бушманов А.Ю., Каримова Д.Ю.

Contribution of the authors:

Research concept and design – Bushmanov A.Yu., Karimova D.Yu.

Collection and processing of material – Titova N.A.

Data analysis – Titova N.A.

Text writing and article design – Titova N.A., Karimova D.Yu.

Editing – Bushmanov A.Yu., Karimova D.Yu.

Список литературы:

1. Алексеев В.Б., Шур П.З., Лир Д.Н. и др. Количественная оценка риска здоровью, обусловленного напряжённостью трудового процесса. *Гигиена и санитария*. 2021; 100(10): 1171-1178. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-10-1171-1178>
2. ГОСТ Р 59093-2020. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ. ОКС 11.040.55: НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ; 2021. <https://docs.cntd.ru/document/566284552> (дата доступа 18.12.2025)
3. Жеглова А.В. Методология оценки профессионального риска работающих при воздействии физических факторов. *Гигиена и санитария*. 2021;100 (9): 975–979. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-9-975-979>
4. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»: Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации № 2 от 28 января 2021 г. [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102030022> (дата обращения 18.12.2025)
5. Hartwig V., Virgili G., Ederica F.M. et al. Occupational exposure to electromagnetic fields in magnetic resonance environment: an update on regulation, exposure

- assessment techniques, health risk evaluation, and surveillance. *Medical & Biological Engineering & Computing*. 2022, Feb;60(2):297-320. DOI: 10.1007/s11517-021-02435-6
6. Sklinda K, Karpowicz J, Stępniewski A. Electromagnetic Exposure of Personnel Involved in Cardiac MRI Examinations in 1.5T, 3T and 7T Scanners. *Int J Environ Res Public Health*. 2021 Dec 22;19(1):76. doi: 10.3390/ijerph19010076. PMID: 35010336; PMCID: PMC8751149.
7. Acri G, Anfuso C, Vermiglio G, Hartwig V. Assessment of Exposure to Time-Varying Magnetic Fields in Magnetic Resonance Environments Using Pocket Dosimeters. *Electronics*. 2022; 11(17):2796. <https://doi.org/10.3390/electronics11172796>
8. Glans A., Wilén J., Lindgren L. et al. Health effects related to exposure of static magnetic fields and acoustic noise—comparison between MR and CT radiographers. *European Radiology*. 2022. Volume 32, pages 7896–7909. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00330-022-08843-y>
9. König A. M., Pöschke A., Mahnken A. H. Health risks for medical personnel due to magnetic fields in magnetic resonance imaging. *Rofo*. 2025 Feb;197(2):135-144. DOI: 10.1055/a-2296-3860
10. Girardello F., Antonietta M. D'A., Mattozzi M. et al. 3D mapping of static magnetic field magnitude and axial-components around a total body 3T MRI clinical scanner. *Frontiers in Public Health*. 2025 Oct 7;13:1625728. DOI: 10.3389/fpubh.2025.1625728
11. Онищенко Г.Г. Актуальные проблемы и перспективы развития методологии анализа риска в условиях современных вызовов безопасности для здоровья населения Российской Федерации. *Анализ риска здоровью*. – 2023. – № 4. –С. 4–18. DOI: 10.21668/health.risk/2023.4.01
12. Руководство Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. Утверждено Главным государственным санитарным врачом РФ 29.07.2005. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора; 2005.
13. Походзей Л.В., Пальцев Ю.П., Федин И.А. Гигиеническое нормирование электромагнитных полей в РФ: история и современное состояние. *Медицина труда и промышленная экология*. 2023;63(10):673-681. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-10-673-681>
14. Походзей Л.В., Руднева Е.А., Пальцев Ю.П. и др. Особенности электромагнитной и шумовой обстановки на рабочих местах персонала отделений МРТ: проблемы гигиенического нормирования и контроля. *Медицина труда и промышленная экология*. 2020. 60(9). <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-9-575-582>

15. Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Профилактическая медицина-2024» под ред. А. В. Мельцера, И. Ш. Якубовой. 2024.
16. Смирнов А. В., Семенов Д. С., Ахмад Е. С. и др. Обзор российской нормативной документации по организации и функционированию кабинетов и отделений магнитно-резонансной томографии. *Digital Diagnostics*. – 2021. – Т. 2, № 4. – С. 453–464. – <https://doi.org/10.17816/DD8090121>
17. Chakeres D.W., Vocht de F. Static magnetic field effects on human subjects related to magnetic resonance imaging systems. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 2005 Feb-Apr;87(2-3):255-65. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2004.08.012
18. Баевский Р.М., Кукушкин Ю.А., Марасанов А.В., Романов Е.А. Метод оценки функционального состояния организма человека // *Медицина труда и промышленная экология*. 1995. № 3. С. 30–34. PMID: 7620801.

References:

1. Alekseev V.B., Shur P.Z., Lir D.N., et al. Quantitative health risk assessment due to the intensity of the work process. *Hygiene and Sanitation*. 2021; 100(10): 1171-1178. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-10-1171-1178> (In Russ.).
2. GOST R 59093-2020. General Safety Requirements for Performing Magnetic Resonance Imaging. OKS 11.040.55: National Standard of the Russian Federation; 2021. <https://docs.cntd.ru/document/566284552> (Accessed: 18.12.2025) (In Russ.).
3. Zheglova A.V. [Methodology for occupational risk assessment of workers exposed to physical factors]. *Hygiene and Sanitation*. 2021;100 (9): 975–979. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-9-975-979> (In Russ.).
4. On approval of Sanitary Rules and Norms SanPiN 1.2.3685-21 "Hygienic standards and requirements for ensuring safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans": Decree of the Chief State Sanitary Physician of the Russian Federation No. 2 of January 28, 2021 [Electronic resource]. Official Internet portal of legal information. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102030022> (Accessed: 18.12.2025) (In Russ.).
5. Hartwig V., Virgili G., Ederica F.M. et al. Occupational exposure to electromagnetic fields in magnetic resonance environment: an update on regulation, exposure assessment techniques, health risk evaluation, and surveillance. *Medical & Biological Engineering & Computing*. 2022, Feb;60(2):297-320. DOI: 10.1007/s11517-021-02435-6
6. Sklinda K, Karpowicz J, Stępniewski A. Electromagnetic Exposure of Personnel Involved in Cardiac MRI Examinations in 1.5T, 3T and 7T Scanners. *Int J Environ Res*

Public Health. 2021 Dec 22;19(1):76. doi: 10.3390/ijerph19010076. PMID: 35010336; PMCID: PMC8751149.

7. Aciri G, Anfuso C, Vermiglio G, Hartwig V. Assessment of Exposure to Time-Varying Magnetic Fields in Magnetic Resonance Environments Using Pocket Dosimeters. *Electronics*. 2022; 11(17):2796.

<https://doi.org/10.3390/electronics11172796>

8. Glans A., Wilén J., Lindgren L. et al. Health effects related to exposure of static magnetic fields and acoustic noise—comparison between MR and CT radiographers. *European Radiology*. 2022. Volume 32, pages 7896–7909. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00330-022-08843-y>

9. König A. M., Pöschke A., Mahnken A. H. Health risks for medical personnel due to magnetic fields in magnetic resonance imaging. *Rofo*. 2025 Feb;197(2):135-144. DOI: 10.1055/a-2296-3860

10. Girardello F., Antonietta M. D'A., Mattozzi M. et al. 3D mapping of static magnetic field magnitude and axial-components around a total body 3T MRI clinical scanner. *Frontiers in Public Health*. 2025 Oct 7;13:1625728. DOI: 10.3389/fpubh.2025.1625728

11. Onishchenko G.G. Current problems and prospects for the development of risk analysis methodology in the context of modern challenges to the health security of the population of the Russian Federation. *Health Risk Analysis*. 2023; (4): 4–18. DOI: 10.21668/health.risk/2023.4.01 (In Russ.).

12. Guideline R 2.2.2006-05. Guidelines for the hygienic assessment of factors in the working environment and the labor process. Criteria and classification of working conditions. Approved by the Chief State Sanitary Physician of the Russian Federation on July 29, 2005. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor; 2005 (In Russ.).

13. Pokhodzei L.V., Pal'tsev Yu.P., Fedin I.A. Hygienic regulation of electromagnetic fields in the Russian Federation: history and current status. *Medicine and Industrial Ecology*. 2023;63(10):673-681. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-10-673-681> (In Russ.).

14. Pokhodzei L.V., Rudneva E.A., Pal'tsev Yu.P., et al. Features of the electromagnetic and noise environment at workplaces of MRI department staff: problems of hygienic regulation and control. *Medicine and Industrial Ecology* 2020; 60(9): 575-582. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-9-575-582> (In Russ.).

15. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation "Preventive Medicine-2024". Ed. by A.V. Mel'tser, I.Sh. Yakubova. 2024 (In Russ.).

16. Smirnov A.V., Semenov D.S., Akhmad E.S., et al. Review of Russian regulatory documents on the organization and functioning of magnetic resonance imaging rooms and departments. *Digital Diagnostics*. 2021; 2(4): 453–464. <https://doi.org/10.17816/DD80901> (In Russ.).
17. Chakeres D.W., de Vocht F. Static magnetic field effects on human subjects related to magnetic resonance imaging systems. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 2005; 87(2-3):255-65. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2004.08.012.
18. Baevskii RM, Kukushkin IA, Marasanov AV, Romanov EA. Metodika otsenki funktsional'nogo sostoianiia organizma cheloveka [Method of assessing the functional state of the human body]. *Med Tr Prom Ekol*. 1995;(3):30-4. Russian. PMID: 7620801.

Сведения об авторах

Бушманов Андрей Юрьевич – д-р мед. наук, профессор, зам. генерального директора по науке – начальник управления радиационной медицины, зав. кафедрой медицины труда, гигиены и профпатологии Медико-биологического университета инноваций и непрерывного образования ФГБУ Государственный научный центр – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 123098, г. Москва, ул. Живописная, 46. E-mail: abushmanov@fmbcfmba.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1565-4560>, SPIN 6518-0861

Титова Наталья Георгиевна – соискатель кафедры общественного здоровья и здравоохранения Медико-биологического университета инноваций и непрерывного образования ФГБУ Государственный научный центр – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 123098, г. Москва, ул. Живописная, 46. E-mail: n3223228@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0003-1496-6893>, SPIN 3156-5537

Каримова Дания Юсуфовна – д-р мед. наук, профессор, профессор кафедры общественного здоровья и здравоохранения Медико-биологического университета инноваций и непрерывного образования ФГБУ Государственный научный центр – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 123098, г. Москва, ул. Живописная, 46. E-mail: danika_karimova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9971-8156>, SPIN 6518-0847

Information about the authors

Bushmanov Andrey Yurievich – Deputy General Director for Science – Head of the Department of Radiation Medicine of the Federal State Budgetary Institution of the State Scientific Center – Federal Medical Biophysical Center named after A.I. Burnazyan of the

Federal Medical and Biological Agency of Russia, Head of the Department of Occupational Medicine, Hygiene and Occupational Pathology of the Federal State Budgetary Healthcare Institution "Federal Medical Biophysical Center named after A.I. Burnazyan". Burnazyan Federal Medical and Biological Agency of Russia" Medical and Biological University of Innovation and Continuing Education of the Federal State Budgetary Institution of the State Scientific Center – Federal Medical Biophysical Center named after A.I. Burnazyan Federal Medical and Biological Agency of Russia, Doctor of Medical Sciences, Professor E-mail: abushmanov@fmbcfmba.ru ; <https://orcid.org/0000-0003-1565-4560>, SPIN 6518-0861

Titova Natalia Georgievna – Applicant of the Department of Public Health and Healthcare of the Medical and Biological University of Innovations and Continuing Education of the Federal State Budgetary Institution State Research Center – Federal Medical Biophysical Center named after A.I. Burnazyan of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, 123098, Moscow, Zhivopisnaya str., 46 E-mail: n3223228@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0003-1496-6893>, SPIN 3156-5537

Karimova Dania Yusufovna – Professor of the Department of Public Health and Healthcare of the Medical and Biological University of Innovations and Continuing Education of the Federal State Budgetary Institution of the Federal State Budgetary Institution of the State Research Center - Federal Medical Biophysical Center named after A.I. Burnazyan of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, 123098, Moscow, Zhivopisnaya Street, 46 E-mail: danialkarimova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9971-8156>, SPIN 6518-0847

Поступила/Received: 29.06.2026

Принята в печать/Accepted: 24.07.2026

УДК 614.7

ПРИМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ПОСРЕДСТВОМ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ: АНАЛИЗ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ НОРМАТИВНЫМИ ДОКУМЕНТАМИ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИМИ ИХ БЕЗОПАСНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Микеров А.Н.^{1,2}, Быков А.В.¹, Эрдниев Л.П.¹

¹ Саратовский медицинский научный центр гигиены Федерального бюджетного учреждения науки «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Саратов, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Саратов, Российская Федерация

Стремительная популяризация беспилотных авиационных систем диктуют необходимость развития нормотворчества, направленного на их безопасное использование. Одним из актуальных направлений исследований в указанной области является анализ нормативных документов, регламентирующих безопасное применение химических веществ посредством беспилотных авиационных систем для здоровья операторов, работников и населения в условиях воздействия химического фактора.

Цель исследования: провести анализ имеющихся на данный момент нормативных документов, регламентирующих безопасное применение химических веществ посредством беспилотных авиационных систем в народном хозяйстве и определить перспективные направления их актуализации.

Материалы и методы. Поиск научных статей проводился в базах данных PubMed, Scopus, Web of Science, а также в библиотеках elibrary.ru и cyberleninka.ru. Использовались ключевые слова «агродроны», «внесение химических веществ с помощью беспилотных систем». Рассматривались публикации на русском и английском языках за 2020 - 2026 годы. Нормативные и законодательные документы анализировались на официальных сайтах Правительства РФ, Федерального агентства воздушного транспорта, Роспотребнадзора РФ,

Министерства сельского хозяйства РФ, Министерства транспорта РФ. Для анализа было отобрано 42 публикации и 27 нормативных документов.

Результаты. В работе приведены результаты анализа обеспеченности нормативными документами, регламентирующими безопасное применение химических веществ посредством беспилотных авиационных систем в народном хозяйстве.

Ограничения исследования. В анализ были включены только публикации на русском и английском языках с 2020–2026 годы.

Заключение. Установлено, что наиболее проработанными в рассматриваемой области исследований являются документы, регламентирующие безопасное применение агрохимикатов в сельском хозяйстве. Определены перспективные направления нормотворчества в области применения химических веществ посредством беспилотных авиационных систем в сферах медицины, ЖКХ, энергетики и транспортной безопасности. По данным направлениям будет необходима разработка методических положений по организации и проведению токсиколого-гигиенических исследований в области оценки безопасности применения химических веществ.

Ключевые слова: нормативные документы, беспилотные системы, химические вещества, направления нормотворчества

Соблюдение этических стандартов. Проведение настоящего исследования не требовало одобрения этического комитета, поскольку работа не связана с использованием человека или животных в качестве объектов исследования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Микеров А.Н., Быков А.В., Эрдниев Л.П. Применение химических веществ посредством беспилотных авиационных систем в народном хозяйстве: анализ обеспеченности нормативными документами, регламентирующими их безопасное применение. Медицина труда и экология человека. 2026; 3:169-188.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10309>

Для корреспонденции: Алексей Владимирович Быков, shniva995@mail.ru

THE USE OF CHEMICALS VIA UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS IN THE NATIONAL ECONOMY: AN ANALYSIS OF THE AVAILABILITY OF REGULATORY DOCUMENTS GOVERNING THEIR SAFE APPLICATION

Anatoly N. Mikerov^{1,2}, Aleksey V. Bykov¹, Leonid P. Erdniev¹

¹ Saratov Hygiene Medical Research Center of the Federal Budget Scientific Institution «Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies», Saratov, Russian Federation

² Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky, Saratov, Russian Federation

The rapid popularization of unmanned aircraft systems necessitates the development of rulemaking aimed at their safe use. One of the relevant research areas in this field is the analysis of regulatory documents governing the safe application of chemicals via unmanned aircraft systems in the national economy.

The purpose of the study: to analyze the currently available regulatory documents governing the safe application of chemicals via unmanned aircraft systems in the national economy and to identify promising directions for their updating.

Materials and methods. The search for scientific articles was conducted in the PubMed, Scopus, Web of Science, and RSCI (Russian Science Citation Index) databases, as well as in the eLibrary.ru and CyberLeninka.ru electronic libraries. The following keywords were used: «use of UAVs for chemical application in the civilian sector», «agrodrones», and «application of chemicals using unmanned aircraft systems». Publications in Russian and English covering the period from 2020 to 2026 were considered. Regulatory, methodological, and legislative documents were analyzed using the official websites of the Government of the Russian Federation, the Federal Air Transport Agency, the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Rospotrebnadzor), the Ministry of Agriculture of the Russian Federation, the Ministry of Transport of the Russian Federation, as well as the State Standards (GOSTs) for the period from 1997 to 2026. For the analysis, 42 publications and 27 regulatory documents were selected.

Results. The paper presents the results of the analysis of the provision with regulatory documents governing the safe application of chemicals via unmanned aircraft systems in the national economy.

Study limitations. The analysis included only publications in Russian and English for the period 2020–2026.

Conclusion. It has been established that the most elaborated documents in the research area under consideration are those regulating the safe application of agrochemicals in agriculture. Promising directions for updating regulatory documents governing the safe application of chemicals via unmanned aircraft systems in various sectors of the national economy have been identified.

Keywords: regulatory documents, unmanned aircraft systems, chemicals, rulemaking directions

Compliance with ethical standards. This study did not require approval by the Ethics Committee, as it did not involve humans or animals as research subjects.

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

Funding. The study did not have sponsorship.

For citation: Bykov A. V., Mikerov A. N, Erdniev L. P. The use of chemicals via unmanned aircraft systems in the national economy: an analysis of the availability of regulatory documents governing their safe application. Occupational health and human ecology. 2026;3:169-188.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10309>

For correspondence: Aleksey V. Bykov, e-mail: shniva995@mail.ru

Эволюционное развитие технологий, цифровизация и роботизация всех сфер человеческой деятельности оказывают глобальное влияние на мировую авиацию, формируя новые виды авиационной техники, сценарии её применения, новые возможности и вызовы для сферы социально-экономического развития, безопасности населения и национальной безопасности России⁵. Наиболее заметный рост популярности применения беспилотных авиационных систем в народном хозяйстве в России отмечается после утверждения президентом перечня поручений по направлениям развития беспилотных авиационных систем (утв. Президентом РФ 30 декабря 2022 г. № Пр-2548)⁶.

В условиях стремительного развития индустрии робототехники и растущей популярности беспилотных авиационных систем различных типов область их

⁵ Распоряжение Правительства РФ от 21.06.2023 г. №1630-р «Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года» (Собрание законодательства Российской Федерации, 2023, №27, ст. 5055).

⁶ Перечень поручений по вопросам развития беспилотных авиационных систем (утв. Президентом РФ 30 декабря 2022 г. № Пр-2548) // СПС «Гарант». – URL: <https://base.garant.ru/406067211/> (дата обращения: 19.05.2026).

применения постоянно расширяется. Одним из перспективных направлений применения беспилотных авиационных систем в различных отраслях народного хозяйства является их использование для аэрозольного распыления химических веществ. Известно, что применение химических веществ в различных отраслях народного хозяйства несет потенциальную опасность развития профессиональной патологии у работников [1] и может обуславливать риск для здоровья населения [2, 3]. Очевидно, что появление новых способов применения химических веществ влечёт за собой целесообразность проведения исследований, направленных на оценку достаточности и своевременности переработки нормативных документов в сфере коммунальной гигиены, а именно – документов, регламентирующих безопасное применение химических веществ в народном хозяйстве.

Цель исследования - провести анализ имеющихся на данный момент нормативных документов, регламентирующих безопасное применение химических веществ с помощью беспилотных авиационных систем в народном хозяйстве и определить перспективные направления их актуализации.

Материалы и методы. Поиск публикаций, посвящённых применению химических веществ с помощью беспилотных авиационных систем в народном хозяйстве проводился в базах данных PubMed, Scopus, Web of Science и РИНЦ, а также в библиотеках elibrary.ru и cyberleninka.ru. Использовались ключевые слова «*use of UAVs for chemical application in the civilian sector*», «агродроны», «внесение химическими веществами с помощью беспилотных авиационных систем», «нормативные документы». Рассматривались публикации на русском и английском языках за 2020 - 2026 годы. Первичный поиск выявил 253 статьи. После удаления дубликатов (n=42) и исключения работ, не соответствующих критериям включения (n=169), для анализа было отобрано 42 полнотекстовых публикации. Нормативно-методические и законодательные документы, соответствующие исследуемой тематике, анализировались на официальных сайтах Правительства РФ, Федерального агентства воздушного транспорта, Роспотребнадзора РФ, Министерства сельского хозяйства РФ, Министерства транспорта РФ за 1997 - 2026 годы. Проанализировано более 70 законодательных актов, нормативно-методических документов и ГОСТов, на 27 из которых в работе отражены сноски. При написании статьи применялись методы системного анализа и классификации, а также сравнительно-правовой и сравнительно-исторический методы. В рамках проведённых исследований заключение локального этического комитета не требуется.

Результаты. В соответствии со Стратегией развития беспилотных авиационных систем в России на период до 2030 г. и на перспективу до 2035 г. существует 8 основных направлений их применения, одним из которых является «внесение веществ». Указанное направление включает в себя работы, проводимые в целях внесения жидких, порошкообразных, газообразных веществ, биологических объектов, применения иных форм и средств защиты растений, связывания грунтов и нейтрализации разлива нефтепродуктов. Основные направления применения беспилотных авиационных систем вырабатывались на протяжении последних десятилетий и нашли широкое применение в различных областях. Научно-технические достижения в области разработок целевых нагрузок различного назначения, устанавливаемых на беспилотные летательные аппараты, обеспечили возможность их применения в военной сфере, нефтегазовой отрасли, сельском хозяйстве, строительном комплексе, лесном хозяйстве, медицине, экологии, а также при выполнении мероприятий по ликвидации чрезвычайных ситуаций и т.д. [4-16].

Проводя анализ нормативных документов регламентирующих применение химических веществ посредством беспилотных авиационных систем в народном хозяйстве, необходимо отметить документы, регулирующие общие правила использования беспилотных авиационных систем, которые базируется на комплексе федеральных документов. Основным регулирующим использованием беспилотных авиационных систем является Воздушный кодекс Российской Федерации от 19 марта 1997 г. № 60-ФЗ⁷. Порядок эксплуатации беспилотных гражданских воздушных судов с максимальной взлётной массой 30 кг и менее, выполнения полётов с их использованием и учёта, регламентируются Федеральными правилами использования воздушного пространства⁸, Правилами учёта беспилотных гражданских воздушных судов⁹ и ведомственными приказами Министерства транспорта Российской Федерации^{10,11}.

⁷ Федеральный закон от 19.03.1997 г. №60 «Воздушный кодекс Российской Федерации» (Собрание законодательства Российской Федерации, 1997, №12, ст. 1383).

⁸ Постановление Правительства РФ от 11.03.2010 г. №138 «Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации» (Собрание законодательства Российской Федерации, 2016, №14, ст. 1649).

⁹ Постановление Правительства РФ от 25.05.2019 г. №658 «Об утверждении Правил учёта беспилотных гражданских воздушных судов с максимальной взлётной массой от 0.25 килограмма до 30 килограммов, ввезённых в Российскую Федерацию или произведённых в Российской Федерации» (Собрание законодательства Российской Федерации, 2019, №22, ст. 2824).

¹⁰ Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 31 июля 2009 г. N 128 «Об утверждении федеральных авиационных правил «Подготовка и выполнение полётов в гражданской авиации» (Зарегистрировано в Минюсте России 31 августа 2009 г. N 14645)

¹¹ Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 23 декабря 2009 г. № 249 «Об утверждении федеральных авиационных правил «Требования к проведению обязательной сертификации физических лиц,

Динамика совершенствования нормативно-правовой базы, определяющей требования к безопасности применения беспилотных авиационных систем, прослеживается в Постановлениях Правительства РФ. Так, Постановление Правительства РФ №1304¹² вносит изменения в «Положение о федеральном государственном контроле (надзоре) в области безопасного обращения с пестицидами и агрохимикатами», утвержденное постановлением Правительства РФ от 30.06.2021 №1067. В изменениях отмечается, что при проведении контрольных (надзорных) мероприятий и профилактических мероприятий могут использоваться беспилотные авиационные системы. Однако указанные документы определяют только безопасное применение самих беспилотных авиационных систем, но не регламентируют порядок использования химических веществ, обеспечивающий безопасность для населения и персонала.

Применение химических веществ с помощью беспилотных авиационных систем в последние годы набирает все большую популярность. Наиболее распространённой областью является сельское хозяйство. Преимущества использования беспилотных авиационных систем для внесения удобрений и пестицидов привели к их массовому применению во всём мире [17–23]. Основное нормативное регулирование безопасного обращения с пестицидами и агрохимикатами в Российской Федерации установлено Федеральным законом №109-ФЗ¹³, однако, указанный документ не регламентирует безопасность применения этих веществ именно с помощью беспилотных авиационных систем.

Развитие нормативной базы в рассматриваемой области началось в 2023 году. Постановлением Правительства РФ от 16.09.2023 №1510¹⁴ в 12 регионах введён экспериментальный правовой режим для беспилотных авиационных систем в сельском хозяйстве. В рамках указанного режима были введены требования к эксплуатации сельскохозяйственных беспилотных авиационных систем сроком на 3 года. В 2024 году Министерство сельского хозяйства Российской Федерации выпустило методические рекомендации по использованию беспилотных

юридических лиц, выполняющих авиационные работы. Порядок проведения сертификации» (Зарегистрировано в Минюсте России 2 февраля 2010 г. № 16185).

¹² Постановление Правительства РФ от 28.12.2025 №1304 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации» («Собрание законодательства Российской Федерации», 2025, №35, ст. 5224).

¹³ Федеральный закон от 19.07.1997 №109-ФЗ «О безопасном обращении с пестицидами и агрохимикатами» (Собрание законодательства Российской Федерации, 1997, №29, ст. 3510).

¹⁴ Постановление Правительства Российской Федерации от 16 сентября 2023 года № 1510 «Об установлении экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций и утверждении Программы экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций по эксплуатации сельскохозяйственных беспилотных авиационных систем»

авиационных систем в растениеводстве¹⁵, а в 2026 году Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 12.02.2026 №2¹⁶, были внесены изменения в СанПиН 2.1.3684-21¹⁷ и СП 2.2.3670-20¹⁸. В частности, на основании результатов научных исследований [24] норматив безопасного расстояния был пересмотрен с 2 км до 700 м.

Одним из перспективных направлений применения химических веществ посредством беспилотных авиационных систем является проведение дезинфекции и дезинсекции с помощью беспилотных авиационных систем в медицинских целях. Направление развивается как в России, так и за рубежом, о чём свидетельствуют соответствующие научные труды [25–31]. Эффективность применения беспилотных авиационных систем для дезинфекции была неоднократно подтверждена в Китае в период борьбы с коронавирусной инфекцией [26], а оценка целесообразности проведения дезинсекции подтверждена в результате пятилетних исследований возможности применения для обработки ларвицидами с помощью беспилотных авиационных систем «ODONATA AGRO». В ходе исследований Российскими учёными была установлена эффективность дезинсекции водоемов различного типа с помощью беспилотных авиационных систем, проводимой с целью уничтожения комаров-переносчиков лихорадки Западного Нила, малярии и других арбовирусных лихорадок Зика, денге, желтой, Чикунгунья [28].

В России дезинфекционные работы в помещениях наиболее распространены в животноводстве. Дезинфекционные мероприятия в животноводстве направлены на уничтожение или инактивацию микроорганизмов (бактерий, вирусов, грибов и других патогенов) на поверхностях, оборудовании и предметах в стойлах, клетках, вольерах и других животноводческих объектах. Порядок и условия дезинфекции помещений животноводческих ферм, комплексов, хозяйств и других объектов, связанных с содержанием животных, определяются Правилами проведения дезинфекции и дезинвазии объектов государственного ветеринарного надзора

¹⁵ Методические рекомендации «Использование беспилотных авиационных систем в растениеводстве» Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. – Москва: Росинформагротех, 2024. – 98 с.

¹⁶ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 12.02.2026 №2 «О внесении изменений в санитарные правила и нормы СанПиН 2.1.3684-21» и СП 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда».

¹⁷ Санитарные правила и нормы СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий».

¹⁸ Санитарные правила СП 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда».

№13-5-2/0525, утвержденными Минсельхозом РФ 15.07.2002 г.¹⁹ В соответствии с Правилами №13-5-2/0525¹⁵ обработка помещений животноводческих ферм, комплексов, хозяйств и других объектов растворами химических дезинфицирующих средств производится путём равномерного орошения поверхностей до полного их смачивания. Для дезинфекции закрытых помещений применяют также аэрозоли, получаемые из растворов дезинфицирующих средств. Отдельные объекты обеззараживают при помощи соответствующих задачам методов дезинфекции (термический, газовый, радиационный, воздушный, паровой, паровоздушный, пароформалиновый) в соответствии с действующими инструкциями. Аналогичным образом осуществляется дезинфекция помещений при проведении мероприятий по профилактике инфекционных болезней в соответствии с СанПиН 3.3686-21²⁰.

Таким образом, нормативное регулирование дезинфекции и дезинсекции с помощью беспилотных авиационных систем фрагментарно. Существуют лишь отдельные методические рекомендации (МР 3.5.2/3.5.5.0367-25¹⁵) для борьбы с комарами на открытой местности. Безопасность персонала и населения при дезинфекции помещений и животноводческих объектов нормативно не обеспечена.

Как часто бывает при появлении и быстром развитии технических новшеств, значительная часть технической информации сосредотачивается в патентах и многочисленных периодических изданиях. Информационный поиск показал, что помимо сельского хозяйства и медицины, в патентной литературе последних лет появляются сведения о потенциальном использовании беспилотных авиационных систем для распыления химических веществ в иных отраслях народного хозяйства. Так, сотрудники Пермского национального исследовательского политехнического университета разработали беспилотную летательную систему, способную автоматизировано и с высокой точностью обрабатывать провода линии электропередач противообледенительной жидкостью [32]. Одновременно, зарубежные разработки беспилотных авиационных систем (например, автоматизированная малярная система Worker Bee компании Apellix, США) позиционируются производителем как системы для покраски судов, мостов и других крупных сооружений, а также для помывки окон и прицельного распыления химикатов.

¹⁹ «Правила проведения дезинфекции и дезинвазии объектов государственного ветеринарного надзора» №13-5-2/0525 (утв. Минсельхозом РФ 15.07.2002 г.).

²⁰ Санитарные правила и нормативы СанПиН 3.3686-21 «Санитарно-эпидемиологические требования по профилактике инфекционных болезней»

С учётом приведённых примеров целесообразно предположить, что лакокрасочные, гидроизолирующие и противообледенительной жидкости различных типов в ближайшей перспективе могут применяться в народном хозяйстве с помощью беспилотных авиационных систем.

Лакокрасочные и гидроизолирующие жидкости различных типов в ближайшем будущем в России, вероятно будут применяться с помощью беспилотных авиационных систем, что позволит осуществлять работы на высоте и при обработке больших площадей поверхностей, как при строительстве различных зданий, так и в судостроении для обработки кораблей с целью снижения затрат на рабочий персонал, который выполняет указанные работы в настоящее время.

Основными нормативными документами, устанавливающими требования к безопасному применению лакокрасочных и гидроизолирующих жидкостей в строительстве в настоящее время, являются ГОСТ 33290-2023²¹, СП 72.13330.2016²², Приказ Минтруда России от 02.12.2020 №849н «Об утверждении Правил по охране труда при выполнении окрасочных работ»²³, ГОСТ Р 72260-2025²⁴, СП 71.13330.2017²⁵. Методы и средства использования лакокрасочных и гидроизолирующих жидкостей, приведённые в указанных документах, не предусматривают применение беспилотных авиационных систем.

В информационном поле отмечаются предпосылки того, что в жилищно-коммунальном хозяйстве (ЖКХ), энергетике и транспортной безопасности для обработки дорожных покрытий, проводов и железнодорожных путепроводов противогололедными материалами и противообледенительными веществами также будут применяться беспилотные авиационные системы [32].

Применение противогололедных материалов для обработки автомобильных дорог и территории населённых пунктов в России регламентируется ГОСТ Р 71880 – 2024²⁶, ГОСТ Р 58427-2020²⁷ и ГОСТ 33387-2015²⁸. Порядок применения

²¹ ГОСТ 33290-2023 «Материалы лакокрасочные, применяемые в строительстве. Общие технические условия».

²² СП 72.13330.2016 «Защита строительных конструкций и сооружений от коррозии. СНиП 3.04.03-85».

²³ Приказ Минтруда России от 02.12.2020 №849н «Об утверждении Правил по охране труда при выполнении окрасочных работ».

²⁴ ГОСТ Р 72260-2025 «Работы изоляционные. Устройство гидроизоляционного слоя на основе полимерных мастик в помещениях многоквартирных домов и общественных зданий. Правила и контроль выполнения работ».

²⁵ СП 71.13330.2017 «Изоляционные и отделочные покрытия. Актуализированная редакция СНиП 3.04.01-87».

²⁶ ГОСТ Р 71880 – 2024 «Дороги автомобильные общего пользования. Противогололедные материалы. Правила применения».

²⁷ ГОСТ Р 58427-2020 «Материалы противогололедные для применения на территории населённых пунктов. Общие технические условия».

²⁸ ГОСТ 33387-2015 «Дороги автомобильные общего пользования. Противогололедные материалы. Технические требования»

противообледенительных веществ в настоящее время определён только для защиты самолётов и установлен в ГОСТ Р 70891-2023²⁹, ГОСТ Р 54264-2010³⁰ и Руководстве по противообледенительной защите воздушных судов на земле ИКАО (DOC 9640-AN/940)³¹. Указанные документы определяют порядок применения химических веществ (противогололедных материалов и противообледенительных веществ) различными способами нанесения, включая использование специальных жидкостей, наносимых с помощью распылителей, установленных на специально оборудованных автомобилях или на подставках. Однако, применение беспилотных авиационных систем для этих целей действующими нормативными документами также не предусмотрено.

Обсуждение. Исследования, направленные на оценку как эффективности, так и безопасности применения химических веществ с помощью беспилотных летательных систем в различных сферах народного хозяйства, актуальны во всём мире [34-42]. Одной из основных целей таких исследований является формирование нормативной базы, регламентирующей обеспечение безопасности населения и персонала, а также исключение негативного влияния на окружающую среду.

Проведенный анализ имеющихся на данный момент нормативных документов, регламентирующих безопасное применение химических веществ посредством беспилотных авиационных систем для здоровья операторов, работников и населения в условиях потенциального воздействия химического фактора показал, что наиболее нормативно проработанным и изученным в научной литературе направлением в настоящее время является сельское хозяйство. Такое положение обусловлено тем, что именно сельское хозяйство стало первой, наиболее востребованной областью народного хозяйства, нуждающейся в гигиеническом нормировании процессов использования беспилотных авиационных систем для обработки масштабных сельскохозяйственных территорий пестицидами и агрохимикатами. Следующим по массовости и значимости направлением применения химических веществ посредством беспилотных авиационных систем является дезинфекция и дезинсекция, применяемая в медицинских целях, что также можно объяснить масштабными территориями и площадями, на которых необходимо проводить санитарную обработку. Особую роль в развитии данного направления сыграла пандемия COVID-19, вызванная коронавирусом SARS-CoV-2,

²⁹ ГОСТ Р 70891–2023 «Средства противообледенительной обработки самолётов. Общие требования».

³⁰ ГОСТ Р 54264-2010 «Воздушный транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Методы и процедуры противообледенительной обработки самолётов. Общие требования».

³¹ Руководством по противообледенительной защите воздушных судов на земле ИКАО (DOC 9640-AN/940).

в результате которой возникла острая необходимость проводить санитарную обработку на значительных площадях. Нормативное регулирование дезинфекции и дезинсекции с помощью беспилотных авиационных систем проработано фрагментарно и охватывает лишь отдельные направления санитарной обработки, такие как борьба с насекомыми на открытой местности. Безопасность персонала и населения при дезинфекции помещений и животноводческих объектов в настоящее время нормативно не обеспечена.

Новизна настоящего исследования заключается в системном, межотраслевом подходе к анализу обеспеченности нормативными документами, регламентирующими применение химических веществ с помощью беспилотных авиационных систем. В отличие от работ, сфокусированных исключительно на сельском хозяйстве [16, 17, 21, 33 и др.] или отдельных трудов по дезинфекции [28, 29], впервые проведен комплексный анализ, охвативший различные области народного хозяйства, в которых применяются и планируются к применению химические вещества посредством беспилотных летательных аппаратов.

Практическая значимость работы состоит в идентификации существующих и появляющихся нормативных пробелов, которые необходимо учитывать при разработке дорожных карт дальнейшего нормотворчества в области безопасного применения химических веществ. Такие технологии, как окраска высотных сооружений или нанесение противогололедных жидкостей на провода ЛЭП [32], уже стремятся к выходу на рынок, но с точки зрения гигиенического нормирования находятся в «серой зоне»: существующие ГОСТы и правила по охране труда описывают ручной или механизированный способ нанесения и совершенно не учитывают риск ингаляционного и кожного воздействия аэрозолей, образующихся при работе с помощью беспилотных авиационных систем.

Тем не менее, результаты проведенного исследования имеют ряд ограничений. Во-первых, существует вероятность языкового смещения, так как анализировались только русско- и англоязычные источники, в результате чего ценный опыт Китая, являющегося мировым лидером в применении агродронов [8, 25], мог быть учтен не полностью. Полученные выводы носят качественный, аналитический характер и служат основой для формулирования гипотез в будущих экспериментальных работах. Во-вторых, быстрое развитие сферы беспилотных авиационных систем означает, что некоторые технологические новинки, особенно в сфере строительной робототехники, могли остаться за рамками анализа из-за их коммерческой закрытости.

В анализ были включены только публикации на русском и английском языках с 2020–2026. годы. Использование ограниченного числа баз данных не исключает возможности пропуска релевантных исследований, опубликованных в других источниках.

Заключение. Установлено, что наиболее проработанными в рассматриваемой области исследований являются документы, регламентирующие безопасное применение агрохимикатов в сельском хозяйстве. Определены перспективные направления нормотворчества в области применения химических веществ посредством беспилотных авиационных систем в таких сферах народного хозяйства, как медицин, ЖКХ, энергетика и транспортная безопасность. По данным направлениям в ближайшие годы потребуются разработку методических положений по организации и проведению токсиколого-гигиенических исследований в области оценки безопасности применения химических веществ. Полученные в ходе исследований результаты целесообразно учитывать при разработке дорожных карт дальнейшего нормотворчества в области безопасного применения химических веществ с использованием беспилотных систем.

Вклад авторов:

Концепция и дизайн исследования, сбор материала и обработка результатов - Микеров А.Н.

Концепция и дизайн исследования - Быков А.В.

Сбор материала и редактирование - Эрдниева Л.П.

Все авторы рассмотрели результаты и одобрили окончательный вариант рукописи.

Author contribution:

Research concept and design, material collection and data processing –Mikerv A.N.

Research concept and design – Bykov A.V.

Material collection and editing – Erdnieva L.P.

All authors have reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

Список литературы

1. Цепкова Г.А., Кузьмич В.Г., Гайдук С.В., Першко В.А. Актуальные вопросы профессиональных заболеваний, связанных с воздействием вредных производственных факторов химической этиологии. Medline.ru. 2023; Токсикология: 640-654.
2. Гизатуллина Д.З., Николаев М.А., Гайфуллина Р.Ф., Валеева Э.Р. Влияние химических веществ атмосферного воздуха и оценка риска для здоровья

- населения города Казани. Оренбургский медицинский вестник. 2024; 3 (47): 14-17.
3. Рахманин Ю.А., Додина Н.С., Алексеева А.В. Современные методические подходы к оценке риска здоровью населения от воздействия химических веществ. Анализ риска здоровью. 2023; 4: 33-41.
4. Кожухова В.В., Чекулдова С.В. Беспилотные авиационные системы как инструмент снижения экологических рисков субъектов хозяйствования нефтегазового сектора. Экономика и предпринимательство. 2025; 8 (181): 1251-1255.
5. A brief review on unmanned aerial vehicles and its applications. ADALYA. 2020; 9 (12).
6. Аникаева А.Д., Мартюшев Д.А. Оценка потенциала применения беспилотных летательных аппаратов в нефтегазовой отрасли. Недропользование. 2020; 4 (20): 344-355.
7. Ликсо В.В. Дроны и робототехника. Большая энциклопедия. Издательство АСТ. 2023; – 161.
8. Wang N.A., Siegmann B., Rascher U. Comparison of a UAV and an airborne-based system to acquire far-red sun-induced chlorophyll fluorescence measurements over structurally different crops. Agricultural and forest meteorology. 2022; 323.
9. Жигалин А.А., Сазонова С.А. Использование БПЛА в строительстве. Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2024; 125-128.
10. Погонышев В.А., Погонышева Д.А., Ульянова Н.Д. Агродроны как инструмент цифровизации технического обеспечения растениеводства. Вестник брянской ГСХА. 2025; 4 (110): 56-61.
11. Kabiyeu A., Abayeva K., Malenko A. Use of uav in forestry. Science and world. 2022; 7 (107): 46-47.
12. Маколова Л.В., Вишняков Я.Д., Вишнякова С.П. Обеспечение комплексной безопасности транспортной деятельности с применением инновационных технологий. Вестник евразийской науки. 2024; 2 (16).
13. Лукманов Ф.Ф. Разработка методики применения беспилотных летательных аппаратов для тушения пожаров, проведения аварийно-спасательных, поисковых и других неотложных работ. Актуальные исследования. 2025; 2-1 (237): 41-43.
14. Альберг Н.И., Борисенкова О.П. Экологическое направление применения беспилотных летательных аппаратов. Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2025; 369–374.
15. Алпысбаева К.А., Бекназарова З.Б., Таишиков М.А. Инновационные технологии в защите растений: разработка и применение аппаратно-программного комплекса

для внесения энтомофагов с использованием БПЛА. Фитосанитария. Карантин растений. 2024; 4-3(20): 5.

16. Рахматуллин Д.А. Использование квадрокоптеров для мониторинга и внесения удобрений на сельскохозяйственных землях. Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024; 3-2 (90):193-201.

17. Toscano F., Fiorentino C., Capece N., Erra U., Travascia D., Scopa A., Drosos M., D'antonio P. Unmanned aerial vehicle for precision agriculture: a review. IEEE ACCESS. 2024; 12: 69188-69205.

18. Абдыкадыров С.К., Исаева А.Э. Об экономической эффективности применения БПЛА в сельском хозяйстве. Вестник Ошского государственного университета. 2024; 5 (2): 97-103.

19. Кузнецов Р.В. Использование БПЛА в сельском хозяйстве как фактор повышения конкурентоспособности. Мировые цивилизации. 2024; 4 (9): 69-75.

20. Крухмалев А.В. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве: современные технологии и перспективы. International journal of advanced studies. 2025; 2 (15): 124-142.

21. Бадмаев А.Х. Международный опыт формирования инновационного потенциала сельского хозяйства и возможности его адаптации в условиях российской федерации. Инновации и продовольственная безопасность. 2025; 50 (4): 106-116.

22. Марченко Л.А., Артюшин А.А., Смирнов И.Г. Технология внесения пестицидов и удобрений беспилотными летательными аппаратами в цифровом сельском хозяйстве. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019; 5(13): 38-45.

23. Припоров И.Е., Богданов Р.П., Аленин П.В., Аушев М.Х. Перспективы внедрения беспилотных летательных аппаратов в сельское хозяйство для химической обработки растений. Известия оренбургского государственного аграрного университета. 2023; 3 (101): 191-195.

24. Ракитский В. Н. и др. Методические подходы к гигиенической оценке безопасных расстояний при выполнении сельскохозяйственных работ с помощью беспилотных авиационных систем // Гигиена и санитария. – 2024; 103 (11): 1405-1411.

25. Kramar V. UAS (drone) in response to coronavirus. Conference of open innovations association, FRUCT. 2020; 27: 90-100.

26. Мирошникова А.А. Пермякова О.Г. Применение БПЛА в медицине. Логистический аудит транспорта и цепей поставок. 2021; 342-344.

27. Горьков А.С., Журавлёв В.К., Горюнов М.А. Способ использования беспилотных летательных аппаратов для проведения дезинфекции. Современные научные исследования и инновации. 2022; 4(132): 342-344.
28. Жулев А.И., Рославцева С.А. Перспектива применения беспилотных летательных аппаратов для целей медицинской дезинсекции. Национальные приоритеты России. 2021; 3 (42): 250-252.
29. Горьков А.С., Боравкова О.В. Вариант использования беспилотных летательных аппаратов для проведения дезинфекции площадных объектов. 2022; 4(32): 9-13.
30. Рославцева С. А., Жулев А. И., Цветков Д. А. Применение беспилотных летательных аппаратов (беспилотных воздушных судов) для акарицидных обработок //Пест-Менеджмент. 2021; (120): 22.
31. Геворкян И. С. Необходимость усиления борьбы с переносчиками возбудителя туляремии в связи с современными изменениями климата //Национальные приоритеты России. 2021; 3 (42): 137-140.
32. Модорский В. Я. Беспилотный летательный аппарат для обработки проводов линии электропередач противообледенительным раствором. Рос. Федерация, пат. 2025109622 МПК В64U 10/13 (2023.01) В64U 101/45 (2023.01) H02G 7/16 (2006.01) B64D 1/18 (2006.01).
33. Эрдниев Л.П., Кузянов Д.А., Гусев Ю.С., Микеров А.Н. Проблемные вопросы применения беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве. Тракторы и сельхозмашины. 2024; 5 (91): 513-521.
34. Chen P. C., Qi H. X., Lin Z. X., Zhou J. K., Li J. W., Ouyang F. Effect of temperature and humidity on droplet deposition of unmanned agricultural aircraft system. International Journal of Plant Protection and Application. 2020; 3(3): 41-49.
35. Chongchong Chen, Shougen Li, Xiaoyi Wu, Yaxiong Wang, Feng Kang Analysis of droplet size uniformity and selection of spray parameters based on the biological optimum particle size theory. PMID: 34555405. 2022; 204: 112076.
36. Keener, H. M., et al. Assessing the potential of unmanned aerial vehicle spraying of aqueous ozone as an outdoor disinfectant for SARS-CoV-2. Environmental Research. 2021; 197: 110944.
37. Monica Lopes-Ferreira, Geonildo Rodrigo Disner, Sonia Corina Hess, Rubens Onofre Nodari. Carla Lima Critical analysis of the extensive aerial application of pesticides and its implications for human health. 2023; 7 (1): 31-36.
38. Xue Chen, Changling Wang, Mingyu Zhao, Zhaoyan Zhu, Tong Zhu, Jingyi Gao, Junxue Wu, Jiajun Han, Fanrong Zhao, Kai Wang Pesticide spray drift and risk assessment using unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer and traditional electric knapsack sprayer (EKS). Science of The Total Environment. 2025; 1005: 180866.

39. Chang Jo Kim, Xiu Yuan, Min Kim, Kee Sung Kyung & Hyun Ho Noh. Monitoring and risk analysis of residual pesticides drifted by unmanned aerial spraying. *Scientific Reports*. 2023; 13 (1): 10834.
40. Airborne transport of herbicides from UAV applications under varied operational and meteorological conditions. *Science of The Total Environment*. 2026; 1032: 181811
41. Pesticides negative effects risk assessment for respiratory system of farmers when using unmanned aerial vehicles. *Toxicology Letters (Supplement)*. 2025; 411: 295–296.
42. Pilarczyk M., Ulewicz R. The Impact of Technological Innovations in the Use of Plant Protection Products on Environmental and Worker Safety. *System Safety: Human - Technical Facility – Environment*. 2025; 7 (1): 184-193.

References:

1. Tsepkova GA, Kuzmich VG, Gaiduk SV et al. Topical issues of occupational diseases associated with exposure to harmful industrial factors of chemical etiology. *Medline.ru*. 2023; 24 (1): 640-654.
2. Gizatullina DZ, Nikolaev MA, Gaifullina RF et al. Impact of atmospheric air chemicals and health risk assessment for the population of the city of Kazan. *Orenburg Medical Herald*. 2024; 12 3(47): 14-17.
3. Rakhmanin Yu.A., Dodina N.S., Alekseeva A.V. Modern methodological approaches to assessing public health risks due to chemicals exposure. 2023; 4: 33-41.
4. Kozhukhova V.V., Chekuldova S.V. Unmanned aircraft systems as an instrument to reduce the environmental risks of oil and gas companies. 2025; 8 (181): 1251-1255.
5. A brief review on unmanned aerial vehicles and its applications. *ADALYA*. 2020; 9 (12).
6. Anikaeva A.D. Martyushev D.A. Assessment of the unmanned aerial vehicle potential application in the oil and gas industry. 2020; 4 (20): 344-355.
7. Likso V.V. Drones and Robotics. *The Great Encyclopedia*. Moscow: AST Publ.; 2023. 161 p.
8. Wang N.A., Siegmann B., Rascher U. Comparison of a UAV and an airborne-based system to acquire far-red sun-induced chlorophyll fluorescence measurements over structurally different crops. *Agricultural and forest meteorology*. 2022; 323.
9. Zhigalin A.A., Sazonova S.A. Use of UAVs in construction. 2024; 125-128.
10. POGONYSHEV V.A., POGONYSHEVA D.A., UL'YANOVA N.D., MILYUTINA E.M. Agrodrones as a tool for digitalization of technical plant growing support. 2025; 4 (110): 56-61.
11. Kabiyeu A., Abayeva K., Malenko A. Use of uav in forestry. *Science and world*. 2022; 7 (107): 46-47.

12. Makolova L.V., Vishnyakov YA.D., Vishnyakova S.P. Ensuring comprehensive safety of transport activities with the use of innovative technologies. 2024; 2 (16).
13. Lukmanov F.F. Development of a methodology for the use of unmanned aerial vehicles for extinguishing fires, conducting rescue, search and other urgent work. 2025; 2-1 (237): 41-43.
14. Alberg N.I., Borisenkova O.P. Environmental applications of unmanned aerial vehicles abstract. 2025; 369–374.
15. Alpysbayeva K.A., Beknazarova Z.B., Taishikov M.A. Innovative technologies in plant protection: development and application of a hardware-software complex for releasing entomophages using UAVs. 2024; 4-3(20): 5.
16. Rakhmatullin D.A. Using quadrocopters for monitoring and applying fertilizers on agricultural land. 2024; 3-2 (90):193-201.
17. Toscano F., Fiorentino C., Capece N., Erra U., Travascia D., Scopa A., Drosos M., D'antonio P. Unmanned aerial vehicle for precision agriculture: a review. IEEE ACCESS. 2024; 12: 69188-69205.
18. Abdykadyrov S.K., Isaeva A.E. On the economic efficiency of using uavs in agriculture. 2024; 5 (2): 97-103.
19. Kuznetsov R.V. The use of UAVs in agriculture as a factor of increasing competitiveness. 2024; 4 (9): 69-75.
20. Krukhmalev A.V. Use of unmanned aerial vehicles in agriculture: modern technologies and prospects. 2025; 2 (15): 124-142.
21. Badmaev A.KH. International experience in developing innovative potential in agriculture and the possibilities of its adaptation in the conditions of the russian federation. 2025; 50 (4): 106-116.
22. Marchenko L.A., Artushin A.A., Smirnov I.S., Mochkova T.V., Spiridonov A.Yu., Kurbanov R.K. Technology of pesticides and fertilizers application with unmanned aerial vehicles in digital agriculture. 2019; 5(13): 38-45.
23. Priporov I.E., Bogdanov R.P., Alenin P.V., Aushev M.KH. Prospects for the introduction of unmanned aerial vehicle in agriculture for chemical treatment of plants. 2023; 3 (101): 191-195.
24. Rakitskii V.N., Kuzmin S.V., Bereznyak I.V., Mishina A.L., Veshchemova T.E., Artyomova O.V., Methodological approaches to hygienic assessment of safe distances when performing agricultural work using unmanned aircraft systems. 2024; 103 (11): 1405-1411.
25. Kramar V. UAS (drone) in response to coronavirus. Conference of open innovations association, FRUCT. 2020; 27: 90-100.

26. Miroshnikova A.A., Permyakova O.G. The use of UAVs in medicine. Logistics audit of transport and supply chains 2021; 342-344.
27. Gorkov A.S., Zhuravlev V.K., Goryunov M.A. A method of using unmanned aerial vehicles for disinfection. Modern scientific research and innovations. 2022; 4(132): 342–344.
28. Roslavl'tseva S.A., Zhulev A.I. The prospect of using unmanned aerial vehicles for purposes of medical disinsection. 2021; 3 (42): 250-252.
29. Gorkov A.S., Boravkova O.V. Possibility of use of unmanned aerial vehicle for disinfection of area objects. 2022; 4(32): 9-13.
30. Roslavl'tseva S.A., Zulev A.I., Cvetkov D.A. The use of unmanned aerial vehicles for acaricide treatments. 2021; (120): 22.
31. Gevorkyan I.S. The need to strengthen the fight against vectors of the tularemia pathogen due to modern climate change. 2021; 3(42): 137–140.
32. Modorskiy V.Ya. An unmanned aerial vehicle for treating power line wires with an anti-icing solution. Russian Federation, patent 2025109622, IPC B64U 10/13 (2023.01) B64U 101/45 (2023.01) H02G 7/16 (2006.01) B64D 1/18 (2006.01)
33. Erdniev L.P., Kuzyanov D.A., Gusev YU.S., Mikerov A.N. The problematic issues of unmanned aerial vehicle application in agriculture. 2024; 5 (91): 513-521.
34. Chen P. C., Qi H. X., Lin Z. X., Zhou J. K., Li J. W., Ouyang F. Effect of temperature and humidity on droplet deposition of unmanned agricultural aircraft system. International Journal of Plant Protection and Application. 2020; 3(3): 41-49.
35. Chongchong Chen, Shougen Li, Xiaoyi Wu, Yaxiong Wang, Feng Kang Analysis of droplet size uniformity and selection of spray parameters based on the biological optimum particle size theory. PMID: 34555405. 2022; 204: 112076.
36. Keener, H. M., et al. Assessing the potential of unmanned aerial vehicle spraying of aqueous ozone as an outdoor disinfectant for SARS-CoV-2. Environmental Research. 2021; 197: 110944.
37. Monica Lopes-Ferreira, Geonildo Rodrigo Disner, Sonia Corina Hess, Rubens Onofre Nodari. Carla Lima Critical analysis of the extensive aerial application of pesticides and its implications for human health. 2023; 7 (1): 31-36.
38. Xue Chen, Changling Wang, Mingyu Zhao, Zhaoyan Zhu, Tong Zhu, Jingyi Gao, Junxue Wu, Jiajun Han, Fanrong Zhao, Kai Wang Pesticide spray drift and risk assessment using unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer and traditional electric knapsack sprayer (EKS). Science of The Total Environment. 2025; 1005: 180866.
39. Chang Jo Kim, Xiu Yuan, Min Kim, Kee Sung Kyung & Hyun Ho Noh. Monitoring and risk analysis of residual pesticides drifted by unmanned aerial spraying. Scientific Reports. 2023; 13 (1): 10834.

40. Airborne transport of herbicides from UAV applications under varied operational and meteorological conditions. *Science of The Total Environment*. 2026; 1032: 181811
41. Pesticides negative effects risk assessment for respiratory system of farmers when using unmanned aerial vehicles. *Toxicology Letters (Supplement)*. 2025; 411: 295–296.
42. Pilarczyk M., Ulewicz R. The Impact of Technological Innovations in the Use of Plant Protection Products on Environmental and Worker Safety. *System Safety: Human - Technical Facility – Environment*. 2025; 7 (1): 184-193.

Информация об авторах:

Быков Алексей Владимирович (Bykov A. V.) - к.т.н.; адрес: 410022, Саратов, ул. Заречная 1А, зд.1; старший научный сотрудник лаборатории гигиенических методов исследования факторов окружающей среды Саратовского МНЦ гигиены ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН» Роспотребнадзора; (Saratov Hygiene Medical Research Center of the Federal Budget Scientific Institution «Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies»); e-mail: shniva995@mail.ru; тел. +79878052196; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5376-1148>.

Микеров Анатолий Николаевич (Mikerv A.N.) - д.б.н.; адрес: 410022, Саратов, ул. Заречная 1А, зд. 1; руководитель Саратовского МНЦ гигиены ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН» Роспотребнадзора; профессор кафедры микробиологии Саратовского государственного медицинского университета им. В.И. Разумовского (Saratov Hygiene Medical Research Center of the Federal Budget Scientific Institution «Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies»; Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky); e-mail: mail@smncg.ru; тел. 8(845-2) 92-78-90; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0670-7918>.

Эрдниев Леонид Петрович (Erdniev L.P.) - к.м.н.; адрес: 410022, Саратов, ул. Заречная 1А, зд.1; ведущий научный сотрудник лаборатории гигиенических методов исследования факторов окружающей среды Саратовского МНЦ гигиены ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН» Роспотребнадзора; (Saratov Hygiene Medical Research Center of the Federal Budget Scientific Institution «Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies»); e-mail: leonid-erdniev@yandex.ru; тел. 8(845-2) 92-78-90; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5187-7361>.

Поступила/Received: 23.06.2026

Принята в печать/Accepted: 24.06.2026

УДК 613.6

ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ РАБОТНИКОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПРОФИЛЯХ НАПРЯЖЕННОСТИ ТРУДОВОГО ПРОЦЕССА: РЕЗУЛЬТАТЫ СКРИНИНГОВОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ГРУПП

Новикова А.В.¹, Широков В.А.^{1,2}, Егорова А.М.¹

¹ ФБУН «Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Мытищи, Россия;

² ФБУН «Екатеринбургский медицинский - научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Екатеринбург, Россия

Современные условия труда сопровождаются возрастанием роли интеллектуальных, эмоциональных и зрительно-сенсорных нагрузок. Поскольку действующая процедура специальной оценки условий труда (СОУТ) не в полной мере отражает профиль напряжённости трудового процесса, актуально применение дополнительных инструментов оценки психосоциальных факторов трудовой среды и анализа их связи с психоэмоциональным состоянием работников.

Цель исследования - оценить связь профиля напряжённости трудового процесса и психосоциальных факторов трудовой среды со скрининговыми показателями психоэмоционального состояния работников различных профессиональных групп.

Материалы и методы. Проведено одномоментное сравнительное исследование 224 работников: административно-управленческих и научно-педагогических работников (n=164), специалистов по разработке программного обеспечения (n=30) и специалистов лабораторных подразделений (n=30). Выполнены анализ данных СОУТ, гигиеническая оценка напряжённости трудового процесса по Р 2.2.2006-05, оценка психосоциальных факторов по COPSOQ III и скрининг психоэмоционального состояния с использованием MBI-GS, HADS и CES-D.

Результаты. По данным СОУТ класс напряжённости трудового процесса у специалистов лабораторных подразделений составлял 3.1–3.2 за счёт сенсорных нагрузок, тогда как в двух других группах соответствовал 2 классу. По Р 2.2.2006-05 класс напряжённости составил соответственно 3.1, 3.1 и 3.2. Неблагоприятные

скрининговые показатели чаще выявлялись в группах с преобладанием интеллектуальных и эмоциональных нагрузок, высокого темпа работы и неблагоприятных особенностей режима труда и отдыха. Высокий уровень эмоционального истощения по MBI-GS отмечался у 56,1%, 70,0% и 20,0% обследованных соответственно ($p<0,001$), тревожные проявления по HADS-A – у 39,0%, 36,7% и 13,3% ($p=0,025$). Интегральный неблагоприятный скрининговый показатель определялся у 56,7%, 70,0% и 20,0% работников соответственно ($p<0,001$).

Заключение. Показано, что неблагоприятные скрининговые показатели психоэмоционального состояния чаще выявлялись в группах с преобладанием интеллектуальных и эмоциональных нагрузок, высокого темпа работы и неблагоприятных особенностей режима труда и отдыха. Повышенный класс напряжённости по СОУТ, обусловленный сенсорными нагрузками, не сопровождался большей распространённостью проявлений психоэмоциональной дезадаптации, что подчёркивает необходимость учёта психосоциального профиля трудовой нагрузки.

Ключевые слова: напряжённость трудового процесса; психосоциальные факторы; психоэмоциональное состояние; профессиональное выгорание; тревожные проявления; депрессивные проявления; COPSQ III; специальная оценка условий труда; гигиена труда

Соблюдение этических стандартов. Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора (протокол № 1-а от 10.01.2023) и проведено в соответствии с принципами Хельсинкской декларации. Все участники подписали добровольное информированное согласие.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа осуществлялась в рамках государственного задания: Рег. № в ЕГИСУ НИОКТР: 124030700017-5.

Для цитирования: Новикова А.В., Широков В.А., Егорова А.М. Психоэмоциональное состояние работников при различных профилях напряженности трудового процесса: результаты скринингового обследования профессиональных групп. Медицина труда и экология человека. 2026; 3: 189-207.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10310>

Для корреспонденции: Анна Владимировна Новикова, e-mail: novikova.av@fncg.ru

PSYCHOEMOTIONAL STATE OF WORKERS WITH DIFFERENT WORK INTENSITY PROFILES: RESULTS OF A SCREENING STUDY IN OCCUPATIONAL GROUPS

Novikova A.V.¹, Shirokov V.A.^{1,2}, Egorova A.M.¹

¹ The Erisman Federal Research Center for Hygiene, Mytishchi, Russian Federation

² Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection among Industrial Workers, Yekaterinburg, Russia

Contemporary work environments are increasingly characterized by cognitive, emotional, and visual–sensory demands. Because the current procedure for the special assessment of working conditions (SAWC) does not fully capture the work intensity profile, additional tools are needed to assess psychosocial factors in the work environment and to examine their association with workers' psychoemotional state.

The purpose of the study. To examine how work intensity profiles and psychosocial factors in the work environment are associated with screening indicators of workers' psychoemotional state across different occupational groups.

Materials and methods. A cross-sectional comparative study included 224 workers: administrative-managerial and research/teaching workers (n=164), software developers (n=30), and laboratory department specialists (n=30). The study included analysis of SAWC data, hygienic assessment of work intensity according to R 2.2.2006-05, assessment of psychosocial factors using COPSOQ III, and screening of psychoemotional state using MBI-GS, HADS, and CES-D.

Results. According to SAWC, laboratory department specialists had a work intensity Class 3.1–3.2, mainly due to sensory demands, whereas the other two groups were classified as Class 2. Under R 2.2.2006-05, the corresponding work intensity Classes were 3.1, 3.1, and 3.2. Adverse screening indicators were more frequent in groups characterized by predominant cognitive and emotional demands, high work pace, and unfavorable work-rest patterns. High emotional exhaustion on the MBI-GS was found in 56.1%, 70.0%, and 20.0% of participants, respectively ($p<0.001$), while anxiety symptoms on the HADS-A were identified in 39.0%, 36.7%, and 13.3% ($p=0.025$). The composite adverse screening indicator was present in 56.7%, 70.0%, and 20.0% of workers, respectively ($p<0.001$).

Conclusion. Adverse screening indicators of workers' psychoemotional state were more common in occupational groups characterized by predominant cognitive and emotional demands, high work pace, and unfavorable work-rest patterns. In contrast, a higher work intensity class according to the special assessment of working conditions, driven primarily by sensory demands, was not associated with a higher prevalence of psychoemotional maladaptation. These findings highlight the need to consider the psychosocial profile of occupational workload.

Keywords: work intensity; psychosocial factors; psychoemotional state; occupational burnout; anxiety symptoms; depressive symptoms; COPSQ III; special assessment of working conditions; occupational hygiene

Compliance with ethical standards. The study was approved by the Local Ethics Committee of the Erisman Federal Research Center for Hygiene of Rospotrebnadzor (Protocol No. 1-a, January 10, 2023) and was conducted in accordance with the principles of the Declaration of Helsinki. All participants provided written informed consent.

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

Funding. The study was conducted as part of the state assignment, registration No. 124030700017-5.

For citation: Novikova A.V., Shirokov V.A., Egorova A.M. Psychoemotional State of Workers with Different Work Intensity Profiles: Results of a Screening Study in Occupational Groups. Occupational health and human ecology. 2026; 3:189-207.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10310>

For correspondence: Anna V. Novikova, e-mail: novikova.av@fncg.ru

Современные условия труда характеризуются изменением структуры профессиональных нагрузок. Наряду с традиционными вредными и опасными производственными факторами всё большее значение приобретают факторы трудового процесса, связанные с интенсивной умственной деятельностью, постоянной обработкой больших объёмов информации, дефицитом времени, ответственностью за результат, эмоциональным напряжением, длительной работой с цифровыми устройствами, сверхурочной занятостью и неблагоприятными особенностями режима труда и отдыха. Эти характеристики

наиболее типичны для работников умственного, управленческого, научно-педагогического и информационно-технологического труда^{32,33,34}.

Напряжённость трудового процесса может отражаться на функциональном состоянии центральной нервной системы, уровне утомления, восстановительных возможностях организма и психоэмоциональном состоянии работников. При длительном воздействии неблагоприятных организационных и психосоциальных факторов она может сопровождаться признаками хронического профессионального стресса, эмоционального выгорания, тревожных и депрессивных проявлений³⁵ [1–4].

В рамках СОУТ оценка напряжённости трудового процесса преимущественно отражает сенсорные нагрузки и монотонность труда, но не включает интеллектуальные и эмоциональные нагрузки, а также особенности режима труда и отдыха³⁶. Поэтому сопоставление класса напряжённости, установленного в рамках СОУТ, с результатами расширенной гигиенической оценки по Р 2.2.2006-05³⁷ и данными скринингового обследования работников представляет научный и практический интерес [3, 4].

Для оценки психосоциальных факторов рабочей среды применяются стандартизированные опросники, позволяющие выявлять неблагоприятные характеристики организации труда, межличностного взаимодействия, режима работы и возможностей восстановления. Одним из таких инструментов является Копенгагенский психосоциальный опросник (COPSOQ), русскоязычная версия которого адаптирована для комплексной оценки психосоциальных факторов трудовой среды на отечественных рабочих местах [6–9]. В сочетании со скрининговыми шкалами тревоги, депрессии и профессионального выгорания

³² Mental health at work : policy brief / World Health Organization, International Labour Organization. – Geneva : WHO, 2022. – URL: <https://iris.who.int/handle/10665/362250> (дата обращения: 23.06.2026).

³³ Psychosocial risks and mental health at work [Электронный ресурс] / International Labour Organization. – Geneva : ILO. – URL: <https://www.ilo.org/topics/safety-and-health-work/mental-health-work> (дата обращения: 23.06.2026).

³⁴ ISO 45003:2021. Occupational health and safety management – Psychological health and safety at work – Guidelines for managing psychosocial risks. – Geneva : International Organization for Standardization, 2021. – URL: <https://www.iso.org/standard/64283.html> (дата обращения: 23.06.2026).

³⁵ ICD-11 for Mortality and Morbidity Statistics [Электронный ресурс] : QD85 Burnout / World Health Organization. – Geneva: WHO, 2019. – URL: <https://icd.who.int/browse/2024-01/mms/en#129180281> (дата обращения: 23.06.2026).

³⁶ Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда, Классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению: Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ № 33н от 24.01.2014 (ред. от 27.04.2023).

³⁷ Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. – М., 2005.

такой подход позволяет выявлять профессиональные группы риска и обосновывать профилактические мероприятия [10–15].

Актуальность исследования определяется необходимостью оценки связи между профилем напряжённости трудового процесса, психосоциальными факторами трудовой среды и психоэмоциональным состоянием работников. Особый интерес представляет сравнение профессиональных групп, различающихся по ведущим компонентам нагрузки: административно-управленческих и научно-педагогических работников, специалистов по разработке программного обеспечения и специалистов лабораторных подразделений.

Цель исследования - оценить связь профиля напряжённости трудового процесса и психосоциальных факторов трудовой среды со скрининговыми показателями психоэмоционального состояния работников различных профессиональных групп.

Материалы и методы

Дизайн исследования. Проведено одномоментное сравнительное исследование, включавшее анализ данных специальной оценки условий труда, гигиеническую оценку напряжённости трудового процесса и анкетирование работников с применением стандартизированных опросников для оценки психосоциальных факторов трудовой среды, профессионального выгорания, тревожных и депрессивных проявлений. Полученные показатели сопоставлялись между профессиональными группами с различным профилем напряжённости трудового процесса.

Контингент обследованных. В исследование были включены 224 работника, распределённые на три профессиональные группы в зависимости от ведущего профиля профессиональной нагрузки и характера напряжённости трудового процесса.

Первую группу составили административно-управленческие и научно-педагогические работники (n=164). Для данной группы были характерны интеллектуальные и эмоциональные нагрузки, высокий темп работы, ответственность за результат, ненормированный рабочий день и сверхурочная работа.

Вторую группу составили специалисты по разработке программного обеспечения (n=30). Ведущими характеристиками трудового процесса в данной группе являлись интеллектуальные, эмоциональные и зрительно-сенсорные нагрузки, длительная

работа с монитором, дефицит времени, ответственность за результат и ненормированный рабочий день.

Третью группу составили специалисты лабораторных подразделений ($n=30$), труд которых характеризовался преимущественно сенсорными нагрузками, длительностью сосредоточенного наблюдения, работой с объектами малого размера и элементами монотонности трудового процесса.

Гигиеническая оценка напряжённости трудового процесса. Гигиеническая оценка напряжённости трудового процесса проводилась на основании анализа данных СОУТ и дополнительной оценки в соответствии с Руководством Р 2.2.2006-05.

При анализе данных СОУТ учитывали класс условий труда по показателю напряжённости трудового процесса.

В рамках расширенной гигиенической оценки анализировали характер и сложность выполняемой работы, степень ответственности за результат собственной деятельности, значимость возможной ошибки, необходимость принятия решений в условиях дефицита времени, интенсивность умственных и эмоциональных нагрузок, зрительно-сенсорные нагрузки, длительность сосредоточенного наблюдения, монотонность трудового процесса, продолжительность рабочего дня, наличие сверхурочной работы и особенности режима труда и отдыха. По результатам гигиенической оценки профессиональные группы были охарактеризованы по ведущим компонентам напряжённости трудового процесса, отражённым в таблице 1.

Оценка психосоциальных факторов трудовой среды. Для оценки психосоциальных факторов трудовой среды использовали валидированную стандартную русскоязычную версию Копенгагенского психосоциального опросника COPSQ III, содержащую 29 шкал и 79 пунктов. Результаты COPSQ III анализировали по отдельным шкалам. Для межгруппового сравнения учитывали показатели, отражающие объём, сложность и темп работы, эмоциональную нагрузку, самостоятельность при выполнении трудовых задач, поддержку со стороны коллег и руководства, организацию труда, баланс работы и личного времени, а также проявления стресса и выгорания. [6–9]. Полученные данные использовали для групповой характеристики психосоциального профиля трудовой среды в изучаемых профессиональных группах.

Скрининговая оценка психоэмоционального состояния. Для скрининговой оценки психоэмоционального состояния работников применяли стандартизированные

опросники: русскоязычную адаптацию Maslach Burnout Inventory – General Survey (MBI-GS) в редакции Н.Е. Водопьяновой, шкалу депрессии Центра эпидемиологических исследований (CES-D) и госпитальную шкалу тревоги и депрессии (HADS) [10–15].

Профессиональное выгорание оценивали по трём шкалам MBI-GS: эмоциональное истощение, цинизм и редукция профессиональной эффективности. Тревожные и депрессивные проявления оценивали с использованием HADS, включающей подшкалы тревоги (HADS-A) и депрессии (HADS-D). CES-D применяли как специализированный скрининговый инструмент для более развернутой оценки депрессивной симптоматики в эпидемиологических исследованиях.

Результаты MBI-GS, HADS и CES-D рассматривали как скрининговые показатели и не использовали для постановки клинического диагноза. Для интегральной оценки психоэмоционального неблагополучия дополнительно учитывали наличие хотя бы одного неблагоприятного скринингового показателя по шкалам MBI-GS, HADS или CES-D. Такой подход позволял оценить как отдельные проявления выгорания, тревоги и депрессивной симптоматики, так и общую распространённость неблагоприятных скрининговых показателей в изучаемых профессиональных группах.

Статистический анализ. Статистическую обработку проводили с использованием описательной и сравнительной статистики. Распределение количественных и балльных показателей оценивали критерием Шапиро–Уилка. Показатели COPSQ III представлены медианой по унифицированной 10-балльной шкале; межгрупповые различия оценивали критерием Краскела–Уоллиса.

Качественные признаки представлены абсолютными значениями и долями (%). Распространённость неблагоприятных скрининговых показателей по MBI-GS, HADS и CES-D сравнивали критерием χ^2 Пирсона, при малых ожидаемых численностях – точным критерием Фишера.

Дополнительно рассчитывали отношение распространённости (prevalence ratio, PR) с 95% доверительными интервалами для первой и второй групп относительно специалистов лабораторных подразделений, принятых в качестве группы сравнения. При отсутствии случаев в группе сравнения PR не рассчитывали. С учётом поперечного дизайна исследования и скринингового характера методик PR рассматривали как описательный показатель, без причинной интерпретации.

Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$. Анализ выполнен в StatTech v. 4.6.3 (ООО «Статтех», Россия).

Результаты. В исследование были включены 224 работника: административно-управленческие и научно-педагогические работники - 164 человека, специалисты по разработке программного обеспечения- 30 человек, специалисты лабораторных подразделений- 30 человек.

По данным СОУТ, у административно-управленческих и научно-педагогических работников, а также у специалистов по разработке программного обеспечения класс условий труда по показателю напряжённости трудового процесса соответствовал 2 классу. У специалистов лабораторных подразделений данный показатель находился в пределах классов 3.1–3.2, что было обусловлено преимущественно сенсорными нагрузками.

При расширенной гигиенической оценке по Р 2.2.2006-05 класс условий труда по показателю напряжённости трудового процесса составил 3.1 у административно-управленческих и научно-педагогических работников и специалистов по разработке программного обеспечения, а у специалистов лабораторных подразделений - 3.2 (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика профессиональных групп по профилю напряжённости трудового процесса

Table 1. Characteristics of occupational groups according to the work intensity profile

Профессиональная группа	n	Ведущий профиль напряжённости трудового процесса	СОУТ	Р 2.2.2006-05
административно-управленческие работники; научно-педагогические работники	164	Интеллектуальные и эмоциональные нагрузки; высокий темп работы; ответственность за результат; ненормированный рабочий день; сверхурочная работа	2	3.1

Профессиональная группа	n	Ведущий профиль напряжённости трудового процесса	СОУТ	Р 2.2.2006-05
Специалисты по разработке программного обеспечения	30	Интеллектуальные, эмоциональные и зрительно-сенсорные нагрузки; длительная работа с монитором; дефицит времени; ответственность за результат; ненормированный рабочий день	2	3.1
Специалисты лабораторных подразделений	30	Преимущественно сенсорные нагрузки; длительность сосредоточенного наблюдения; работа с объектами малого размера; элементы монотонности трудового процесса	3.1–3.2, за счёт сенсорных нагрузок	3.2

Примечание: в таблице представлены классы условий труда по показателю напряжённости трудового процесса. Ведущий профиль напряжённости трудового процесса приведён как качественная гигиеническая характеристика профессиональной группы и определён по совокупности данных СОУТ, анализа трудовых функций и дополнительной оценки напряжённости труда по Р 2.2.2006-05. Класс напряжённости по СОУТ отражает оценку в рамках действующей методики специальной оценки условий труда; класс по Р 2.2.2006-05 приведён по результатам расширенной гигиенической оценки с учётом интеллектуальных, эмоциональных, сенсорных нагрузок, монотонности труда, а также особенностей режима труда и отдыха. Ведущий профиль напряжённости не является самостоятельным классом условий труда.

Note: the table presents working condition classes based on the indicator of work process intensity. The dominant profile of work process intensity is provided as a qualitative hygienic characteristic of the occupational group and is determined based on a combination of data from the Special Assessment of Working Conditions (SAWC), an analysis of work functions, and an additional assessment of work intensity in accordance with R 2.2.2006-05. The strain class based on the Special Assessment of Working Conditions (SAWC) reflects the evaluation conducted under the current SAWC

methodology; the class based on standard R 2.2.2006-05 is derived from an expanded hygienic assessment that takes into account intellectual, emotional, and sensory loads, work monotony, and the specific nature of work and rest schedules. The primary strain profile does not constitute a standalone class of working conditions.

Таким образом, СОУТ позволила выявить повышенный класс напряжённости трудового процесса у специалистов лабораторных подразделений за счёт сенсорных нагрузок. При этом интеллектуальные и эмоциональные нагрузки, высокий темп работы, сверхурочная занятость и особенности режима труда и отдыха в рамках СОУТ не учитывались, что обусловило расхождение с результатами расширенной гигиенической оценки по Р 2.2.2006-05.

По данным COPSQ III профессиональные группы различались по психосоциальному профилю трудовой среды. С учётом использованной шкалы 1–10, где значения 1–3 соответствуют критически неблагоприятному уровню, более низкие значения отражали менее благоприятную оценку соответствующего фактора. У административно-управленческих и научно-педагогических работников наиболее неблагоприятные значения отмечались по шкалам когнитивных и эмоциональных нагрузок, а также темпа работы. У специалистов по разработке программного обеспечения менее благоприятные показатели были выявлены по шкалам темпа работы и выгорания, что соответствовало высокой когнитивной нагрузке, длительной работе с цифровыми устройствами и неблагоприятным особенностям режима труда и отдыха. У специалистов лабораторных подразделений показатели когнитивной нагрузки были более благоприятными, а значения по шкале эмоционального напряжения находились в оптимальном диапазоне. В целом полученные данные согласовывались с преимущественно сенсорным и монотонным характером труда в данной группе и меньшей выраженностью интеллектуальных и эмоциональных нагрузок (табл. 2).

Таблица 2. Показатели психосоциальных факторов трудовой среды по данным COPSQ III в профессиональных группах

Table 2. Psychosocial work environment indicators according to COPSQ III in occupational groups

Показатель COPSOQ III	Административно- управленческие и научно-педагогические работники, n=164	Специалисты по разработке программного обеспечения, n=30	Работники лабораторных подразделений, n=30	p
Когнитивные нагрузки	2,0	3,0	5,0	<0,001
Эмоциональные нагрузки	2,9	4,0	7,0	<0,001
Темп работы	2,7	2,2	4,0	<0,001
Контроль рабочего времени	3,9	5,0	7,0	<0,001
Общая оценка здоровья	3,2	6,0	4,0	<0,001
Выгорание	4,4	2,8	7,0	<0,001

Примечание: показатели COPSOQ III представлены в виде медианы по унифицированной 10-балльной шкале; значения 1–3 рассматривались как критически неблагоприятные. Меньшие значения соответствуют более неблагоприятной оценке фактора.

Note: COPSOQ III indicators are presented as medians on a standardized 10-point scale; values of 1–3 were considered critically unfavorable. Lower values correspond to a more unfavorable assessment of the factor.

Результаты скринингового обследования показали различия в распространённости неблагоприятных показателей психоземotionalного состояния между профессиональными группами (табл. 3). Высокий уровень эмоционального истощения по MBI-GS отмечался у 56,1% административно-управленческих и научно-педагогических работников, 70,0% специалистов по разработке программного обеспечения и 20,0% специалистов лабораторных

подразделений ($p < 0,001$). Тревожные проявления по HADS-A (≥ 8 баллов) выявлялись у 39,0%, 36,7% и 13,3% работников соответственно ($p = 0,025$).

Депрессивные проявления по HADS-D (≥ 8 баллов) регистрировались у 16,5% работников первой группы, 3,3% специалистов по разработке программного обеспечения и отсутствовали у специалистов лабораторных подразделений ($p = 0,006$). По CES-D (≥ 16 баллов) депрессивная симптоматика выявлялась у 23,2%, 10,0% и 3,3% обследованных соответственно ($p = 0,016$). Интегральный неблагоприятный скрининговый показатель, определяемый как наличие хотя бы одного неблагоприятного показателя по MBI-GS, HADS или CES-D, отмечался у 56,7%, 70,0% и 20,0% работников соответственно ($p < 0,001$), с максимальной распространённостью у специалистов по разработке программного обеспечения и минимальной - у специалистов лабораторных подразделений.

Таблица 3. Распространённость неблагоприятных скрининговых показателей психоэмоционального состояния в профессиональных группах

Table 3. Prevalence of adverse screening indicators of psychoemotional state across occupational groups

Показатель	Группа 1 n=164 n (%)	PR (95% ДИ)	Группа 2 n=30 n (%)	PR (95% ДИ)	Группа 3 n=30 n (%)	p
Высокий уровень эмоционального истощения по MBI-GS	92 (56,1%)	2,80 (1,35–5,81)	21 (70,0%)	3,50 (1,65–7,43)	6 (20,0%)	<0,001
Тревожные проявления по HADS-A, ≥ 8 баллов	64 (39,0%)	2,93 (1,15–7,43)	11 (36,7%)	2,75 (0,99–7,68)	4 (13,3%)	0,025
Депрессивные проявления по HADS-D, ≥ 8 баллов	27 (16,5%)	—	1 (3,3%)	—	0 (0%)	0,006*
Депрессивная симптоматика по CES-D,	38 (23,2%)	6,95 (0,99–	3 (10,0%)	3,00 (0,33–	1 (3,3%)	0,016

Показатель	Группа 1 n=164 n (%)	PR (95% ДИ)	Группа 2 n=30 n (%)	PR (95% ДИ)	Группа 3 n=30 n (%)	p
≥16 баллов		48,72)		27,24)		
Интегральный неблагоприятный скрининговый показатель	93 (56,7%)	2,84 (1,37– 5,87)	21 (70,0%)	3,50 (1,65– 7,43)	6 (20,0%)	<0,001

Примечание: данные представлены как n (%). Группа 1 – административно-управленческие и научно-педагогические работники; группа 2 – специалисты по разработке программного обеспечения; группа 3 – специалисты лабораторных подразделений. PR – отношение распространенности; 95% ДИ – 95% доверительный интервал. В качестве группы сравнения для расчёта PR принята группа 3. Для HADS-D PR не рассчитывали в связи с отсутствием случаев в группе сравнения. p – уровень значимости межгрупповых различий; сравнение долей проводили с использованием критерия χ^2 Пирсона, при малых ожидаемых численностях – точного критерия Фишера. * – точный критерий Фишера.

Note: data are presented as n (%). Group 1 – administrative, managerial, and academic staff; Group 2 – software development specialists; Group 3 – laboratory staff. PR – prevalence ratio; 95% CI – 95% confidence interval. Group 3 served as the reference group for PR calculation. PR was not calculated for HADS-D due to the absence of cases in the reference group. p – significance level of intergroup differences; proportions were compared using Pearson's χ^2 test, or Fisher's exact test for small expected frequencies. * – Fisher's exact test.

Обсуждение. Полученные результаты свидетельствуют, что скрининговые показатели психоэмоционального состояния работников в большей степени согласовывались с психосоциальным профилем трудовой нагрузки, чем с формальным классом напряжённости, установленным в рамках СОУТ. По данным COPSQ III первые две профессиональные группы характеризовались более напряжённым психосоциальным профилем трудовой среды, тогда как у специалистов лабораторных подразделений показатели когнитивной и эмоциональной нагрузки были более благоприятными и соответствовали преимущественно сенсорному и монотонному характеру труда.

По сравнению со специалистами лабораторных подразделений в первых двух группах чаще отмечались эмоциональное истощение, тревожные проявления и интегральный неблагоприятный скрининговый показатель. При этом более высокий класс напряжённости по данным СОУТ у специалистов лабораторных подразделений, обусловленный сенсорными нагрузками, не сопровождался большей распространённостью проявлений психоэмоциональной дезадаптации. Это указывает на то, что формальное повышение класса напряжённости не всегда отражает выраженность нагрузочного воздействия на центральную нервную систему и психоэмоциональное состояние работников. Практическое значение полученных данных заключается в обосновании необходимости дополнения традиционной оценки напряжённости трудового процесса инструментами оценки психосоциальных факторов.

Ограничения исследования. При интерпретации результатов следует учитывать поперечный дизайн исследования и различную численность профессиональных групп, что не позволяет делать выводы о причинно-следственных связях. Применённые опросники использовались для скрининговой оценки психоэмоционального состояния работников без постановки клинических диагнозов. Полученные данные могут служить основанием для дальнейшего мониторинга психосоциальных факторов труда и разработки профилактических мероприятий на организационном уровне.

Заключение. Профиль напряжённости трудового процесса, включающий интеллектуальные и эмоциональные нагрузки, высокий темп работы, ответственность за результат, сверхурочную занятость и неблагоприятные особенности режима труда и отдыха, сопровождался более высокой распространённостью проявлений психоэмоциональной дезадаптации у работников. Полученные данные подтверждают гигиеническую значимость напряжённости трудового процесса как фактора нагрузочного воздействия на центральную нервную систему. При этом повышение класса напряжённости по СОУТ, обусловленное преимущественно сенсорными нагрузками, не сопровождалось большей распространённостью проявлений психоэмоциональной дезадаптации. Это обосновывает необходимость учёта не только класса напряжённости, установленного в рамках СОУТ, но и профиля трудовой нагрузки, а также психосоциальных факторов трудовой среды.

Дополнение традиционной гигиенической оценки инструментами оценки психосоциальных факторов, включая COPSQ III и шкалы эмоционального

выгорания, тревожных и депрессивных проявлений, может использоваться для раннего выявления профессиональных групп риска и обоснования профилактических мероприятий на организационном уровне.

Информация о вкладе авторов: концепция и дизайн исследования: Новикова А.В., Егорова А.М., Широков В.А., анализ и интерпретация результатов: Новикова А.В., Егорова А.М., Широков В.А., литературный обзор: Новикова А.В., Егорова А.М., подготовка рукописи: Новикова А.В., Егорова А.М., Широков В.А. Все авторы ознакомились с результатами работы и одобрили окончательный вариант рукописи.

Author contributions: study concept and design: Novikova A.V., Egorova A.M., Shirokov V.A.; data analysis and interpretation: Novikova A.V., Egorova A.M., Shirokov V.A.; literature review: Novikova A.V., Egorova A.M.; manuscript preparation: Novikova A.V., Egorova A.M., Shirokov V.A. All authors have reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

Список литературы:

1. Maslach C., Schaufeli W.B., Leiter M.P. Job burnout. *Annual Review of Psychology*. 2001;52:397–422. doi: 10.1146/annurev.psych.52.1.397.
2. van der Molen H.F., Nieuwenhuijsen K., Frings-Dresen M.H.W., de Groene G. Work-related psychosocial risk factors for stress-related mental disorders: an updated systematic review and meta-analysis. *BMJ Open*. 2020;10. doi: 10.1136/bmjopen-2019-034849.
3. Новикова А.В., Широков В.А., Егорова А.М. Напряженность труда как фактор риска развития синдрома эмоционального выгорания и тревожно-депрессивных расстройств в различных профессиональных группах: обзор литературы. *Здоровье населения и среда обитания — ЗНиСО*. 2022;30(10):67–74. doi: 10.35627/2219-5238/2022-30-10-67-74.
4. Bakker A.B., Demerouti E., Sanz-Vergel A.I. Job Demands–Resources Theory: ten years later. *Annual Review of Organizational Psychology and Organizational Behavior*. 2023;10:25–53. doi: 10.1146/annurev-orgpsych-120920-053933.
5. Бухтияров И.В., Юшкова О.И., Афанасьева Ю.Ф. Гигиеническая оценка условий труда на рабочих местах специалистов с высокой компьютерной нагрузкой и обоснование мер профилактики. *Медицина труда и промышленная экология*. 2024;64(6):420–427. doi: 10.31089/1026-9428-2024-64-6-420-427.

6. Burr H., Berthelsen H., Moncada S., Nübling M., Dupret E., Demiral Y., et al. The third version of the Copenhagen Psychosocial Questionnaire. *Safety and Health at Work*. 2019;10(4):482–503. doi: 10.1016/j.shaw.2019.10.002.
7. Lincke H.J., Vomstein M., Lindner A., Nolle I., Häberle N., Haug A., et al. COPSQ III in Germany: validation of a standard instrument to measure psychosocial factors at work. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 2021;16:50. doi: 10.1186/s12995-021-00331-1.
8. Новикова А.В., Перевезенцева А.С., Широков В.А. Разработка русскоязычной версии Копенгагенского психосоциального опросника COPSQ III и её адаптация в различных профессиональных группах. *Гигиена и санитария*. 2024;103(2):130–135. doi: 10.47470/0016-9900-2024-103-2-130-135.
9. Novikova A.V., Shirokov V.A., Kuzmin S.V., Novikov A.A., Perevezentseva A.S. Validation of the Russian version of the Copenhagen Psychosocial Questionnaire. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2026;1–14. doi: 10.1080/15459624.2026.2649753.
10. Schaufeli W.B., Leiter M.P., Maslach C., Jackson S.E. Maslach Burnout Inventory – General Survey. In: Maslach C., Jackson S.E., Leiter M.P., editors. *The Maslach Burnout Inventory Manual*. 3rd ed. Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press; 1996. p. 19–26.
11. Водопьянова Н.Е., Старченкова Е.С., Наследов А.Д. Стандартизированный опросник «Профессиональное выгорание» для специалистов социально-экономических профессий. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 12. Психология. Социология. Педагогика*. 2013;(4):17–27.
12. Водопьянова Н.Е., Старченкова Е.С. Синдром выгорания: диагностика и профилактика. СПб.: Питер; 2008.
13. Zigmond A.S., Snaith R.P. The Hospital Anxiety and Depression Scale. *Acta Psychiatrica Scandinavica*. 1983;67(6):361–370. doi: 10.1111/j.1600-0447.1983.tb09716.x.
14. Radloff L.S. The CES-D Scale: a self-report depression scale for research in the general population. *Applied Psychological Measurement*. 1977;1(3):385–401. doi: 10.1177/014662167700100306.
15. Андрющенко А.В., Дробижев М.Ю., Добровольский А.В. Сравнительная оценка шкал CES-D, BDI и HADS(D) в диагностике депрессий в общей медицинской практике. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2003;103(5):11–18.

References:

1. Maslach C., Schaufeli W.B., Leiter M.P. Job burnout. *Annual Review of Psychology*. 2001;52:397–422. doi: 10.1146/annurev.psych.52.1.397.

2. van der Molen H.F., Nieuwenhuijsen K., Frings-Dresen M.H.W., de Groene G. Work-related psychosocial risk factors for stress-related mental disorders: an updated systematic review and meta-analysis. *BMJ Open*. 2020;10. doi: 10.1136/bmjopen-2019-034849.
3. Novikova A.V., Shirokov V.A., Egorova A.M. Work intensity as a risk factor for burnout syndrome and anxiety-depressive disorders in various occupational groups: a literature review. *Public Health and Life Environment – PH&LE*. 2022;30(10):67–74. doi: 10.35627/2219-5238/2022-30-10-67-74. [in Russian]
4. Bakker A.B., Demerouti E., Sanz-Vergel A.I. Job Demands–Resources Theory: ten years later. *Annual Review of Organizational Psychology and Organizational Behavior*. 2023;10:25–53. doi: 10.1146/annurev-orgpsych-120920-053933.
5. Bukhtiyarov I.V., Yushkova O.I., Afanasyeva Yu.F. Hygienic assessment of working conditions at workplaces of specialists with high computer workload and substantiation of preventive measures. *Occupational Medicine and Industrial Ecology*. 2024;64(6):420–427. doi: 10.31089/1026-9428-2024-64-6-420-427. [in Russian]
6. Burr H., Berthelsen H., Moncada S., Nübling M., Dupret E., Demiral Y., et al. The third version of the Copenhagen Psychosocial Questionnaire. *Safety and Health at Work*. 2019;10(4):482–503. doi: 10.1016/j.shaw.2019.10.002.
7. Lincke H.J., Vomstein M., Lindner A., Nolle I., Häberle N., Haug A., et al. COPSQ III in Germany: validation of a standard instrument to measure psychosocial factors at work. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 2021;16:50. doi: 10.1186/s12995-021-00331-1.
8. Novikova A.V., Perevezentseva A.S., Shirokov V.A. Development of the Russian version of the Copenhagen psychosocial questionnaire COPSQ III and its adaptation in various occupational groups. *Hygiene and Sanitation*. 2024;103(2):130–135. doi: 10.47470/0016-9900-2024-103-2-130-135.
9. Novikova A.V., Shirokov V.A., Kuzmin S.V., Novikov A.A., Perevezentseva A.S. Validation of the Russian version of the Copenhagen Psychosocial Questionnaire. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2026;1–14. doi: 10.1080/15459624.2026.2649753.
10. Schaufeli W.B., Leiter M.P., Maslach C., Jackson S.E. Maslach Burnout Inventory – General Survey. In: Maslach C., Jackson S.E., Leiter M.P., editors. *The Maslach Burnout Inventory Manual*. 3rd ed. Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press; 1996. p. 19–26.
11. Vodopyanova N.E., Starchenkova E.S., Nasledov A.D. Standardized questionnaire “Professional burnout” for specialists in socioeconomic professions. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 12. Psychology. Sociology. Pedagogy*. 2013;(4):17–27. [in Russian]

12. Vodopyanova N.E., Starchenkova E.S. Burnout syndrome: diagnosis and prevention. Saint Petersburg: Piter; 2008. [in Russian]
13. Zigmond A.S., Snaith R.P. The Hospital Anxiety and Depression Scale. *Acta Psychiatrica Scandinavica*. 1983;67(6):361–370. doi: 10.1111/j.1600-0447.1983.tb09716.x.
14. Radloff L.S. The CES-D Scale: a self-report depression scale for research in the general population. *Applied Psychological Measurement*. 1977;1(3):385–401. doi: 10.1177/014662167700100306.
15. Andryushchenko A.V., Drobizhev M.Yu., Dobrovolsky A.V. Comparative assessment of the CES-D, BDI and HADS(D) scales in the diagnosis of depression in general medical practice. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2003;103(5):11–18. [in Russian]

Сведения об авторах

Новикова Анна Владимировна, к.м.н., старший научный сотрудник Института общей и профессиональной патологии; e-mail Novikova.AV@fncg.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6915-0355>.

Широков Василий Афонасьевич, д.м.н., профессор, научный руководитель Института общей и профессиональной патологии; e-mail: shirokov.va@fncg.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1461-1761>.

Егорова Анна Михайловна, д.м.н., заведующая отделом медицины труда ФБУН «Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана»; e-mail: egorova.am@fncg.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7929-9441>.

Author information

Anna V. Novikova, Cand. Sci. (Med.), Senior Researcher, Institute of General and Occupational Pathology; e-mail: Novikova.AV@fncg.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6915-0355>.

Vasiliy A. Shirokov, Dr. Sci. (Med.), Professor, Scientific Director, Institute of General and Occupational Pathology; e-mail: shirokov.va@fncg.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1461-1761>.

Anna M. Egorova, Dr. Sci. (Med.), Head of the Department of Occupational Medicine; e-mail: egorova.am@fncg.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7929-9441>.

Поступила/Received: 29.06.2026

Принята в печать/Accepted: 18.08.2026

УДК 613.63; 57.044

БИОМОНИТОРИНГ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ НАГРУЗКИ

Ларионова Т.К.¹, Даукаев Р.А.¹, Иващенко М.А.², Артёменко Е.П.², Адиева Г.Ф.¹,
Аллаярова Г.Р.¹, Зеленковская Е.Е.¹

¹ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека»,
Уфа, Россия

²ФБУН «Екатеринбургский медицинский - научный центр профилактики и
охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора,
Екатеринбург, Россия

Определение микроэлементов в биологических средах человека является одним из наиболее информативных подходов к оценке техногенной химической нагрузки. Биомониторинг отражает фактически поступившую в организм дозу вещества и позволяет учитывать сочетанное воздействие производственных, экологических и индивидуальных факторов.

Цель исследования: обоснование информативности определения металлов в различных биологических средах работников, занятых во вредных условиях труда, как метода биоиндикации антропогенной нагрузки и элемента социально-гигиенического мониторинга.

Материалы и методы. Работа выполнена как обзорно-аналитическое исследование с использованием материалов комплексного обследования территории с выраженной техногенной нагрузкой ртутью и производства получения свинца из вторичного сырья, а также результатов определения металлов в различных биологических средах работников, занятых во вредных условиях труда на данных предприятиях. Определение металлов выполнено методами атомно-абсорбционной спектрометрии и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.

Результаты. В условиях длительного загрязнения производственной и окружающей среды ртуть выявлялась практически во всех изученных биосредах: крови, моче, волосах, ногтях, слюне, зубах и грудном молоке. Это подтверждает возможность использования многосредового подхода для оценки как профессиональной, так и экологической составляющих риска. В производственной зоне ртуть выступала ведущим вредным химическим фактором, а в окружающей среде формировала дополнительную нагрузку через

атмосферный воздух, питьевую воду и пищевые цепи. Результаты определения металлов в крови и моче работников производства свинца из вторичного сырья демонстрируют возможность выявления не только ведущего токсиканта, но и сопутствующего микроэлементного дисбаланса.

При проведении биологического мониторинга наиболее оперативными субстратами являются кровь и моча. Кровь позволяет оценивать циркулирующую фракцию металла, поступившую в организм в относительно недавний период, а моча отражает выведение металла и функциональную вовлеченность выделительной системы. Для ряда металлов, например, ртути и кадмия моча может быть более чувствительным показателем хронического поступления и выведения. Вместе с тем отсутствие тесной связи между кровью и мочой возможно, поскольку эти среды отражают разные этапы токсикокинетики. Волосы и ногти обладают иной диагностической логикой: они накапливают металлы и сохраняют информацию о воздействии дольше, чем кровь. Это делает их удобными для массовых скрининговых обследований и ретроспективного анализа. Волосы неинвазивны, просты в отборе и транспортировке, а также могут применяться как архивный материал. Ногти характеризуются большей стабильностью содержания некоторых элементов и могут использоваться для оценки более длительной нагрузки. Зубы и слюна имеют значение при специальных задачах, связанных с депонированием металлов и оценкой их циркуляции в организме.

Заключение. Биомониторинг металлов необходимо проводить дополнительно к контролю воздуха рабочей зоны в тех случаях, когда требуется оценить фактически поглощённую дозу вещества, учесть поступление металла различными путями, проверить эффективность средств индивидуальной защиты, охарактеризовать длительное или неравномерное воздействие, расследовать аварийную ситуацию, либо объяснить несоответствие между результатами контроля производственной среды и состоянием работников. Решение о его проведении должно приниматься отдельно для каждого металла с учётом его токсикокинетики, информативности используемой биологической среды, возможных непроизводственных источников и наличия критериев интерпретации.

Ключевые слова: биомониторинг, вредные условия труда, тяжелые металлы, биологические среды, социально-гигиенический мониторинг

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Ларионова Т.К., Даукаев Р.А., Иващенко М.А., Артёменко Е.П., Адиева Г.Ф., Аллаярова Г.Р., Зеленковская Е.Е. Биомониторинг металлов в условиях производственной нагрузки. Медицина труда и экология человека. 2026; 3: 208-227.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10311>

Для корреспонденции: Татьяна Кенсариновна Ларионова, e-mail: larionovatk@yandex.ru

BIOMONITORING OF METALS UNDER CONDITIONS OF PRODUCTION STRESS

Larionova T.K.¹, Daukayev R.A.¹, Ivashchenko M.A.², Artemenko E.P.², Adieva G.F.¹, Allayarova G.R.¹, Zelenkovskaya E.E.¹

¹ Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, Russia

² Yekaterinburg Medical Research Center for the Prevention and Protection of Workers' Health in Industrial Enterprises of Rospotrebnadzor, Yekaterinburg, Russia

The determination of trace elements in human biological media is one of the most informative approaches to assessing anthropogenic chemical exposure. Biomonitoring reflects the actual dose of a substance that has entered the body and makes it possible to take into account the combined effect of occupational, environmental, and individual factors. The purpose of study

The purpose of study is to substantiate the informativeness of determining metals in various biological media of workers engaged in hazardous working conditions as a method of bioindication of anthropogenic exposure and an element of socio-hygienic monitoring.

Materials and methods. The work was carried out as a review and analytical study using materials from a comprehensive survey of the territory with a pronounced anthropogenic load of mercury and the production of lead from secondary raw materials, as well as the results of determining metals in various biological media of workers employed in hazardous working conditions at these enterprises. The determination of metals was carried out using atomic absorption spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry.

Results. Under conditions of prolonged contamination of the production and environmental environment, mercury was detected in almost all the studied biological media: blood, urine, hair, nails, saliva, teeth, and breast milk. This confirms the possibility of using a multi-media approach to assess both occupational and environmental risk components. In the production zone, mercury acted as the leading harmful chemical factor, while in the environment it created an additional load through atmospheric air, drinking water, and food chains. The results of determining metals in the blood and urine of workers in the lead production industry using secondary raw materials demonstrate the possibility of identifying not only the main toxicant but also the accompanying trace element imbalance..

When conducting biological monitoring, the most responsive substrates are blood and urine. Blood allows for the assessment of the circulating fraction of the metal that entered the body in a relatively recent period, while urine reflects the excretion of the metal and the functional involvement of the excretory system. For a number of metals, including mercury and cadmium, urine may be a more sensitive indicator of chronic exposure and excretion. At the same time, the absence of a close relationship between blood and urine is possible, since these media reflect different stages of toxicokinetics. Hair and nails have a different diagnostic logic: they accumulate metals and retain information about exposure longer than blood. This makes them convenient for mass screening examinations and retrospective analysis. Hair is non-invasive, easy to collect and transport, and can also be used as an archival material. Nails are characterized by greater stability of the content of certain elements and can be used to assess longer-term exposure. Teeth and saliva are important in special tasks related to the deposition of metals and the assessment of their circulation in the body.

Conclusion. Biomonitoring of metals should be carried out in addition to monitoring the air in the work area in cases where it is necessary to assess the actual absorbed dose of the substance, take into account the intake of the metal through various routes, verify the effectiveness of personal protective equipment, characterize prolonged or uneven exposure, investigate an emergency situation, or explain the discrepancy between the results of monitoring the production environment and the health status of workers. The decision to carry it out should be made separately for each metal, taking into account its toxicokinetics, the informativeness of the biological medium used, possible non-production sources, and the availability of interpretation criteria.

Keywords: biomonitoring, harmful working conditions, heavy metals, biological environments, social and hygienic monitoring

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Funding: the study had no sponsorship.

For citation: Larionova T.K., Daukayev R.A., Ivashchenko M.A., Artemenko E.P., Adieva G.F., Allayarova G.R., Zelenkovskaya E.E. Biomonitoring of metals under occupational stress conditions. Occupational Health and Human Ecology. 2026; 3: 208-227.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10311>

For correspondence: Tatyana K. Larionova , e-mail: larionovatk@yandex.ru

Тяжелые металлы и близкие к ним по токсикологической значимости элементы относятся к числу приоритетных загрязнителей производственной и окружающей среды. Их источниками являются предприятия цветной и черной металлургии, горнодобывающей промышленности, энергетики, нефтехимии, переработки вторичного сырья и отходов [1-4]. Особое значение для медицины труда имеют металлы с высокой способностью к кумуляции, поливалентным токсическим действием и возможностью длительного сохранения в биологических тканях: ртуть, свинец, кадмий, мышьяк, никель, хром и ряд других элементов [5-7].

Гигиенический контроль воздуха рабочей зоны позволяет определить потенциальную внешнюю экспозицию, однако не отражает полностью фактическое поступление металла в организм. Внутренняя доза зависит от фракционного состава аэрозоля, пути поступления, продолжительности воздействия, эффективности средств индивидуальной защиты, особенностей питания, состояния обмена веществ и индивидуальной чувствительности. Поэтому определение металлов в биологических средах работников является важной частью оценки условий труда, значимым звеном медицинского наблюдения, оценки риска и профилактики профессиональных заболеваний [8-10].

Измерение концентраций тяжёлых металлов в крови и моче позволяет оценить индивидуальную дозу воздействия, выявить ранние изменения до появления клинических симптомов и скорректировать технологический процесс и способ защиты работников.

Биологические среды неравнозначны по диагностической информативности. Кровь характеризует преимущественно циркулирующую дозу и недавнее воздействие; моча отражает выведение металлов и состояние выделительных механизмов; волосы и ногти могут использоваться для оценки более длительного

накопления и ретроспективного скрининга; слюна, зубы и грудное молоко применимы в специальных задачах, связанных с оценкой депонирования, обмена и передачи токсикантов. В условиях воздействия ртути, свинца, кадмия и других кумулирующих элементов анализ только одной биосреды часто недостаточен, так как не позволяет различить текущую, хроническую и остаточную нагрузку.

Значимость биомониторинга возрастает при аварийных ситуациях, несовершенстве технологических процессов, изменении состава сырья, переработке отходов и наличии одновременно производственного и экологического источников поступления металлов. В таких условиях биологические среды позволяют оценить не только факт контакта с загрязнителем, но и реальную степень его включения в обменные процессы организма.

Цель исследования. Обосновать информативность определения металлов в различных биологических средах работников, занятых во вредных условиях труда, как метода биоиндикации антропогенной нагрузки и элемента социально-гигиенического мониторинга.

Материалы и методы. Работа выполнена как обзорно-аналитическое исследование с использованием материалов комплексного эколого-гигиенического обследования территории с выраженной техногенной нагрузкой и производственного контингента, занятого во вредных условиях труда. Рассматривалась система «производственная среда - окружающая среда - биологические среды человека», что позволило оценить поступление металлов не только по концентрациям во внешних объектах, но и по их фактическому содержанию в организме.

В анализ включены данные о загрязнении воздуха рабочей зоны, атмосферного воздуха, питьевой воды, почвы и пищевых продуктов, а также результаты определения макро- и микроэлементов в крови, моче, волосах, ногтях, зубах и слюне.

В качестве модельного металла для оценки возможностей биоиндикации рассматривалась ртуть, поскольку она характеризуется высокой токсичностью, кумулятивными свойствами, способностью к миграции по пищевым цепям и сочетанием производственных и экологических путей поступления [11, 12].

Для прикладной иллюстрации использован фрагмент исследования содержания химических элементов в крови и моче работников металлургического цеха

предприятия по производству свинца из вторичного сырья. Основная группа обследованных включала плавильщиков, группа сравнения была представлена работниками других подразделений предприятия.

Определение металлов в биологических материалах и объектах среды обитания выполнено методами атомно-абсорбционной спектрометрии и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Ключевые моменты анализа - единообразие пробоподготовки, учет матрицы биосубстрата, а также сопоставление результатов с профессиональными, популяционными и лабораторными референсными уровнями.

Результаты представлены в виде среднего арифметического значения и ошибки среднего ($M \pm m$). Для межгрупповых сравнений применялись критерий Краскела-Уоллиса и U-критерий Манна-Уитни; различия считались статистически обусловленными при $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение. В условиях длительного загрязнения производственной и окружающей среды ртуть выявлялась практически во всех изученных нами биосредах: крови, моче, волосах, ногтях, слюне, зубах и грудном молоке. Это подтверждает возможность использования многосредового подхода для оценки как профессиональной, так и экологической составляющих риска. В производственной зоне ртуть выступала ведущим вредным химическим фактором, а в окружающей среде формировала дополнительную нагрузку через атмосферный воздух, питьевую воду и пищевые цепи.

На начальном этапе наблюдения в период чрезвычайной экологической ситуации содержание ртути в крови рабочих фабрики и жителей поселка было максимальным. У значительной части обследованных концентрации превышали допустимые уровни, а у работников производственного объекта средний уровень ртути в крови оставался в течение длительного времени на уровне $66,39 \pm 7,17$ мкг/дм³.

В моче ртуть обнаружена у всех обследованных в диапазоне 1,03 – 12,10 мкг/дм³ при среднем уровне $4,42 \pm 0,68$ мкг/дм³. У 68,75 % обследованных значения находились в пределах физиологически допустимого уровня (до 5 мкг/дм³), у 12,5% - в зоне критических значений (7,5 - 15,0 мкг/дм³), выше критического уровня ртуть в моче не выявлялась. Выраженная связь между содержанием ртути в крови и моче отсутствовала, что подтверждает необходимость одновременного анализа нескольких биологических сред.

Концентрации ртути в волосах работников колебались в диапазоне от 10,0 до 1407,5 мкг/кг, при среднем значении $297,15 \pm 59,86$ мкг/кг. Выявлена прямая корреляционная связь средней силы между концентрациями металла в волосах и крови ($r = 0,58$).

В зубах концентрация ртути составляла 9,89 – 174,05 мкг/кг, при среднем значении $68,72 \pm 16,71$ мкг/кг, в слюне $0,74 \pm 0,18$ мкг/дм³. Между содержанием ртути в крови и слюне выявлена высокая корреляционная зависимость ($r = 0,86$), что указывает на потенциальную информативность слюны при специальных задачах биомониторинга.

После локализации в поселке источников загрязнения снижение ртути в биосредах происходило неодинаково: в крови содержание уменьшалось быстрее, в волосах - медленнее, а в ногтях металл сохранялся наиболее устойчиво. За два месяца содержание ртути в крови снизилось в 7,7 раза, в волосах в 2,4 раза, в ногтях примерно в 1,4 раза.

В таблице 1 представлены основные результаты определения ртути в биологических средах работников при хронической интоксикации.

Таблица 1. Основные результаты определения ртути в биологических средах работников производственного объекта

Table 1. Main results of mercury determination in biological media of industrial facility workers

Показатель	Результат	Интерпретация
Нг в крови	0,27 - 129,75 мкг/дм ³	профессиональная нагрузка
Нг в волосах	10,0 - 1407,5 мкг/кг	профессиональная нагрузка
Нг в моче	1,03 – 12,10 мкг/дм ³	выведение и циркуляция
Нг в зубах	9,89 – 174,05 мкг/кг	долговременное депонирование
Кровь - слюна	$r = 0,86$	связь биосред

Кровь - волосы	$r = 0,58$	связь биосред
Снижение в крови	в 7,7 раза	быстрая динамика
Снижение в волосах	в 2,4 раза	средняя динамика
Снижение в ногтях	в 1,4 раза	архивный субстрат

Расчет биологической дозы ртути показал, что для работников производственного объекта основным путем поступления являлся ингаляционный. При усвоении около 80% паров неорганической ртути суточное поступление с воздухом составляло около 0,202 мг, с пищей - 0,006 мг, с водой - 0,001 мг, в сумме это соответствовало около 0,209 мг в сутки. В структуре суммарного техногенного риска у промышленных рабочих доля собственно производственной среды составляла около 70 %, а экологическая составляющая - 21,1 – 35,2 % в зависимости от периода наблюдения и режима работы предприятия.

После остановки производства и замены источника водоснабжения содержание ртути в биосредах снизилось, что подтверждает связь биомаркеров с фактическим поступлением металла. После возобновления работы предприятия содержание ртути в крови работающих вновь стало нарастать, увеличившись с 0,50 до 15,45 мкг/дм³. Несмотря на то, что средний уровень не превышал максимально допустимых значений, у части обследованных риск оставался значимым. Это показывает, что биомониторинг чувствителен не только к аварийным эпизодам, но и к изменению режима технологического процесса.

Определение металлов в крови и моче работников металлургического производства, связанного с переработкой вторичного свинец-содержащего сырья, подтвердило практическое значение биомониторинга (таблица 2).

Таблица 2. Содержание химических элементов (Pb, Sr, Zn) в биосредах работников металлургического производства

Table 2. Content of chemical elements (Pb, Sr, Zn) in biological media of metallurgical production workers

Показатель	Основная группа	Группа сравнения
Содержание Pb в крови, мкг/дм ³	382,11±39,80	22,63±7,01
Содержание Pb в моче, мкг/дм ³	50,54±10,02	1,79±1,37
Содержание Sr в крови, мкг/дм ³	15,10±1,86	10,53±4,27
Содержание Zn в моче, мкг/дм ³	206,28±49,77	549,64±241,53

Наиболее выраженные различия установлены по свинцу. Уровень свинца в крови рабочих основной группы превышал соответствующий показатель группы сравнения в 17 раз; различия статистически обусловлены ($H=18,59$; $p<0,001$).

Содержание свинца в моче у работников основной группы было в 5,46 раза выше показателя группы сравнения. Для межгрупповых различий также установлена статистическая обусловленность ($H=9,77$; $p=0,01$). Одновременно отмечалось снижение уровня цинка в моче обследованных основной группы, что может отражать нарушение обмена эссенциальных элементов на фоне свинцовой нагрузки. Содержание стронция, также входящего в состав производственной пыли, в крови работников основной группы было значимо выше, чем в группе сравнения.

Результаты определения свинца, стронция и цинка в крови и моче работников металлургического производства демонстрируют возможность выявления не только ведущего токсиканта, но и сопутствующего микроэлементного дисбаланса.

Проведенный при периодическом медицинском осмотре работников предприятия лабораторный анализ наиболее чувствительных к свинцовой интоксикации показателей подтвердил специфические симптомы воздействия металла: снижение содержания гемоглобина в крови у 20,8 % работников и повышение уровня δ-аминолевулиновой кислоты в моче у 43,6 %. Кроме того, у 24,3 % обследованных выявлена эссенциальная гипертензия, у 33,0 % - заболевания

костно-мышечной системы и соединительной ткани, которые также могут быть вызваны длительным воздействием свинца.

Полученные данные позволяют рассматривать определение металлов в биосредах как самостоятельный и необходимый компонент гигиенической оценки вредных условий труда. По сравнению с анализом воздуха рабочей зоны биомониторинг обладает принципиальным преимуществом: он отражает не потенциальную, а фактически реализованную внутреннюю нагрузку, однако в большинстве случаев на предприятиях ограничиваются только измерением концентрации металлов в воздухе. Биомониторинг особенно важен при сочетанном воздействии нескольких путей поступления - ингаляционного, перорального и контактного.

В таблице 3 приведены литературные примеры связи загрязнения воздуха рабочей зоны свинцом и ртутью с содержанием металлов в биосредах человека.

Таблица 3. Содержание свинца и ртути в воздухе рабочей зоны и биосредах работников

Table 3. The content of lead and mercury in the air of the work area and the biological environment of workers

Производство	Содержание металла в воздухе	Уровень металла в крови работников	Уровень металла в моче работников
Свинец			
Аккумуляторный завод, Иран [13]	0,30±0,02 мг/м ³	559,5 мкг/дм ³	–
Аккумуляторный завод, Япония [14]	0,007±0,004 мг/м ³	102,0±40,0 мкг/дм ³	–
Ртуть			
Завод «Каустик» [3]:	0,005–0,008 мг/м ³	29,20±11,82	–

вакуумная выпарка		мкг/дм ³	
электролиз	0,025–0,046 мг/м ³	49,24±4,48 мкг/дм ³	26,93±5,62 мкг/дм ³
регенерация	0,020–0,075 мг/м ³	81,40±14,1 мкг/дм ³	30,4±5,8 мкг/дм ³

При производстве аккумуляторов содержание свинца в воздухе рабочей зоны на одном предприятии было 0,30 мг/м³, уровень в крови работников составлял 559,5 мкг/дм³ [13], в аналогичном производстве, со значительно меньшим содержанием металла в воздухе (0,007 мг/м³), в крови его концентрация также ниже (102,0 ± 40,0 мкг/дм³) [14]. В процессе амальгамирования максимальное содержание ртути в воздухе рабочей зоны превышало ПДК_{сс} в 10 раз - 0,05 мг/м³, что приводило к значительному росту содержания металла в крови (49,24 ± 4,48 мкг/дм³) и моче (26,93 ± 5,62 мкг/дм³) [3].

Связь между содержанием металлов в производственной среде и их уровнем в биосредах работников подтверждает значение биомониторинга для оценки профессионального риска. В зарубежной практике биологический мониторинг закреплён в стандартах OSHA по свинцу и кадмию, в биологических индексах ACGIH и в европейских подходах к контролю канцерогенов и мутагенов [15-18].

Отдельное значение имеет внеплановый биомониторинг при авариях, нарушениях технологического процесса, изменении сырья или запуске оборудования после реконструкции. Пример ртутного загрязнения показывает, что смена режима работы предприятия сопровождалась изменением содержания ртути не только в биосредах работников, но и населения. Следовательно, биомониторинг должен применяться не только как плановый медицинский контроль, но и как инструмент оценки последствий технологических инцидентов и эффективности проведенных профилактических мероприятий.

Приведенные данные по металлургическому производству показывают, что анализ крови и мочи работников остается наиболее доступным методом выявления внутренней нагрузки металлами в условиях промышленного производства. Однако эти данные не должны подменять более широкий подход:

при длительном воздействии и при необходимости ретроспективной оценки целесообразно дополнять кровь и мочу анализом волос и ногтей.

Комплексный анализ научных данных показал, что каждая биологическая среда имеет собственное значение и преимущества для оценки воздействия химических элементов (таблица 4).

Таблица 4. Информативность биологических сред при определении химических элементов

Table 4. Informative value of biological media in the determination of chemical elements

Биологическая среда	Преимущество использования	Что отражает	Основное применение
Кровь	Оперативность	Циркулирующая доза	Недавнее воздействие (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Zn)
Моча	Неинвазивный отбор	Выведение металла	Биомониторинг (Cd, Hg, As, Cr, Cu)
Волосы	Длительное хранение	Накопленная нагрузка	Скрининг и ретроспектива
Ногти	Стабильность	Длительная нагрузка	Дополнительный архивный субстрат
Слюна	Простота отбора	Связь с циркуляцией	Специальные исследования
Зубы	Депонирование	Долговременное накопление	Ретроспективная оценка

Наиболее оперативными субстратами являются кровь и моча. Кровь позволяет оценивать циркулирующую фракцию металла, поступившую в организм в

относительно недавний период, а моча отражает выведение металла и функциональную вовлеченность выделительной системы. Для ряда металлов, включая ртуть и кадмий, моча может быть более чувствительным показателем хронического поступления и выведения. Вместе с тем отсутствие тесной связи между кровью и мочой возможно, поскольку эти среды отражают разные этапы токсикокинетики.

Волосы и ногти обладают иной диагностической логикой: они накапливают металлы и сохраняют информацию о воздействии дольше, чем кровь. Это делает их удобными для массовых скрининговых обследований и ретроспективного анализа. Волосы неинвазивны, просты в отборе и транспортировке, а также могут применяться как архивный материал. Ногти характеризуются большей стабильностью содержания некоторых элементов и могут использоваться для оценки более длительной нагрузки. Зубы и слюна имеют значение при специальных задачах, связанных с депонированием металлов и оценкой их циркуляции в организме.

Заключение. Биомониторинг металлов необходимо проводить дополнительно к контролю воздуха рабочей зоны в тех случаях, когда требуется оценить фактически поглощённую дозу вещества, учесть поступление металла различными путями, проверить эффективность средств индивидуальной защиты, охарактеризовать длительное или неравномерное воздействие, расследовать аварийную ситуацию, либо объяснить несоответствие между результатами контроля производственной среды и состоянием работников. Решение о его проведении должно приниматься отдельно для каждого металла с учётом его токсикокинетики, информативности используемой биологической среды, возможных непроизводственных источников и наличия критериев интерпретации.

Список литературы:

1. Шилов В.В., Никанов А.Н., Ковшов А.А., Баринов В.А., Гудков А.Б., Ермолин С.П. Токсиколого-гигиеническая характеристика воздуха рабочей зоны производства цветных металлов. *Медицина труда и промышленная экология*. 2025; 65(5): 326-332. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2025-65-5-326-332>.
2. Абдрахманова Е.Р., Гимранова Г.Г., Репина Э.Ф., Ахметшина В.Т., Бейгул Н.А., Газизова Н.Р., и др. Влияние производственных факторов на формирование здоровья работников металлургического производства. *Медицина труда и экология человека*. 2025; 3: 6-21. <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2025-10301>.

3. Шаяхметов С.Ф., Лисецкая Л.Г., Мещаклова Н.М. Оценка загрязнения воздуха рабочей зоны ртутью и содержания её в биосредах у работников производства каустика и хлора /*Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра СО РАМН*, 2010; 4(74): 59-63.
4. Еремейшвили А.В., Крылова П.П. Содержание тяжёлых металлов в биосубстратах работников нефтехимической промышленности. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(5): 568-571. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-5-568-571> <https://elibrary.ru/qlawlf/>
5. Nordberg G.F., Fowler B.A., Nordberg M., editors. *Handbook on the Toxicology of Metals*. 5th ed. London: Academic Press; 2022.
6. Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B.B., Beeregowda K.N. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdiscip Toxicol*. 2014; 7(2): 60-72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>.
7. Скальный А.В., Рудаков И.А. Биоэлементы в медицине. – М.: Издательский дом «ОНИКС: 21 век: Мир, 2004. - 272 с.
8. Морозов Д.Ю. Биомониторинг человека как метод оценки воздействия факторов химической природы на работников судоремонтной и судостроительной отрасли. *Морская медицина*. 2021; 7(2): 69-79. <https://doi.org/10.22328/2413-5747-2021-7-2-69-79>
9. Зибарев Е.В., Эллинген Д.Г., Томассен И., Чащин В.П., Чащин М.В., Кузьмин А.В. Биологический мониторинг как способ управления профессиональными рисками. *Уральский медицинский журнал*. 2011; 9(87): 16-18.
10. Angerer J., Ewers U., Wilhelm M. Human biomonitoring: state of the art. *Int J Hyg Environ Health*. 2007; 210(3–4): 201-228. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2007.01.024>.
11. Ильченко И.Н. Обзор исследований по оценке воздействия ртути на население в постсоветских странах с использованием данных биомониторинга человека. *Здравоохранение Российской Федерации*. 2015; 59 (1): 48-53.
12. Гладышев В.Б. Токсичные свойства ртути и ее влияние на организм животных и человека. *The Scientific Heritage*. 2021; 81(2): 16-22. <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-81-2-16-22> <https://elibrary.ru/mxseab>.
13. Ghobakhloo S, Mostafaii GR, Mehravar F, Javady Moghadam Z, Ghobakhloo Z, Miranzadeh MB. Biomonitoring of occupational lead exposure in a lead-acid batteries factory. *Clin Cancer Investig J*. 2022. Available from: <https://ccij-online.org/storage/files/article/95e54b0b-1536-4bd9-9faa-b0867e90e4f2-7bdjl9mJzPK7JJOG/33-ccl.pdf>
14. Ono A, Horiguchi H. Relationship between personal-sampled air lead and blood lead in low-lead-exposure workers in Japan to apply multiple regression models determining

permissible air lead concentration. *J Occup Health*. 2021; 63(1): e12264. <https://doi.org/10.1002/1348-9585.12264>.

15. Occupational Safety and Health Administration. 29 CFR 1910.1025: Lead. Washington (DC): OSHA.

16. Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. Blood lead level guidance. Atlanta: CDC; 2024.

17. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. TLVs and BEIs based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati: ACGIH; 2024.

18. European Parliament and Council. Directive 2004/37/EC on the protection of workers from the risks related to exposure to carcinogens or mutagens at work. *Official Journal of the European Union*. 2004.

References:

1. Shilov V.V., Nikanov A.N., Kovshov A.A., Barinov V.A., Gudkov A.B., Ermolin S.P. Toxicological and hygienic characteristics of air in the working zone of non-ferrous metals production. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2025; 65(5): 326-332. (In Russ.) <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2025-65-5-326-332>.

2. Abdrakhmanova E.R., Gimranova G.G., Repina E.F., Akhmetshina V.T., Beigul N.A., Gazizova N.R., et al. The influence of production factors on the formation of the health of workers in metallurgical industries, preventive measures. *Occupational Health and Human Ecology*. 2025; 3: 6-21. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2025-10301>.

3. Shayakhmetov S.F., Lisetskaya L.G., Meshakova N.M. Assessments of air pollution with mercury in working zone And its content in biomaterials of employees at the caustic and chlorine production. *Bulletin of the East Siberian Scientific Center of the Russian Academy of Medical Sciences*, 2010; 4(74): 59-63. (In Russ.)

4. Ereimeyshvili A.V., Krylova P.P. Influence of occupational factors on the content of heavy metals in biosubstrates in petrochemical industry workers. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(5): 568-571. (In Russ.) <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-5-568-571> <https://elibrary.ru/qlawlf>.

5. Nordberg G.F., Fowler B.A., Nordberg M., editors. *Handbook on the Toxicology of Metals*. 5th ed. London: Academic Press; 2022.

6. Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B.B., Beeregowda K.N. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdiscip Toxicol*. 2014; 7(2): 60-72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>.

7. Skalnyi A.V., Rudakov I.A. Bioelements in medicine. Moscow: ONYX Publishing House: 21st century: Mir Publ., 2004. - 272 p. (In Russ.)
8. Morozov D.Yu. Human biomonitoring as a method for assessing the impact of chemical factors on workers of the ship repair and shipbuilding industry. *Marine medicine*. 2021; 7(2): 69-79. (In Russ.). <https://doi.org/10.22328/2413-5747-2021-7-2-69-79>.
9. Zibarev E.V., Ellingsen D.G., Thomassen Y., Chashchin V.P., Chashchin M.V., Kuzmin A.V. Biological monitoring as method occupational risks assessment. *Ural Medical Journal*. 2011; 9(87): 16-18. (In Russ.)
10. Angerer J., Ewers U., Wilhelm M. Human biomonitoring: state of the art. *Int J Hyg Environ Health*. 2007; 210(3-4): 201-228. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2007.01.024>.
11. Ilchenko I.N. Review of studies on assessing the impact of mercury on the population in post-Soviet countries using human biomonitoring data. *Health Care of the Russian Federation*. 2015; 59(1): 48-53 (In Russ.)
12. Gladyshev V. B. Toxic properties of mercury and its effect on the organisms of animals and humans. *The Scientific Heritage*. 2021; 81(2): 16-22. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-81-2-16-22> <https://elibrary.ru/mxseab>
13. Ghobakhloo S, Mostafaii GR, Mehravar F, Javady Moghadam Z, Ghobakhloo Z, Miranzadeh MB. Biomonitoring of occupational lead exposure in a lead-acid batteries factory. *Clin Cancer Investig J*. 2022. Available from: <https://ccij-online.org/storage/files/article/95e54b0b-1536-4bd9-9faa-b0867e90e4f2-7bdjl9mJzPK7JJOG/33-ccl.pdf>
14. Ono A, Horiguchi H. Relationship between personal-sampled air lead and blood lead in low-lead-exposure workers in Japan to apply multiple regression models determining permissible air lead concentration. *J Occup Health*. 2021; 63(1): e12264. <https://doi.org/10.1002/1348-9585.12264>.
15. Occupational Safety and Health Administration. 29 CFR 1910.1025: Lead. Washington (DC): OSHA.
16. Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. Blood lead level guidance. Atlanta: CDC; 2024.
17. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. TLVs and BEIs based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati: ACGIH; 2024.
18. European Parliament and Council. Directive 2004/37/EC on the protection of workers from the risks related to exposure to carcinogens or mutagens at work. *Official Journal of the European Union*. 2004.

Вклад авторов: Ларионова Т.К., Иващенко М.А. – разработка концепции и дизайна исследования, написание текста; Ларионова Т.К., Даукаев Р.А., Иващенко М.А., Артеменко Е.П., Адиева Г.Ф. – сбор и обработка материала, выполнение анализов; Аллаярова Г.Р., Зеленковская Е.Е. – статистическая обработка данных; Ларионова Т.К., Даукаев Р.А. – научное редактирование. Все авторы утвердили окончательную версию статьи.

Author contribution: Larionova T.K., Ivashchenko M.A. – development of the concept and design of research, writing the text; Larionova T.K., Daukaev R.A., Ivashchenko M.A., Artemenko E.P., Adieva G.F. – collection and processing of material, performing analyses; Allayarova G.R., Zelenkovskaya E.E. – statistical data processing; Larionova T.K., Daukaev R.A. – scientific editing. All the authors have approved the final version of the article. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Информация об авторах:

Ларионова Татьяна Кенсариновна - к.б.н., доцент, ведущий научный сотрудник химико-аналитического отдела ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», ул. Степана Кувыкина, д. 94, г. Уфа, 450106, Россия; e-mail: larionovatk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9754-4685>.

Даукаев Рустем Аскарлович - к.б.н., заведующий химико-аналитическим отделом ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», ул. Степана Кувыкина, д. 94, г. Уфа, 450106, Россия; e-mail: ufa.lab@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0421-4802>.

Иващенко Максим Андреевич - научный сотрудник ФБУН «Екатеринбургский медицинский – научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора, ул. Попова, д. 30, г. Екатеринбург, 620014, Россия; e-mail: ivachenko@ymrc.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1253-3202>

Артёменко Елизавета Павловна - научный сотрудник ФБУН «Екатеринбургский медицинский – научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора, ул. Попова, д. 30, г. Екатеринбург, 620014, Россия; e-mail: artemenkoe@ymrc.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0125-0063>

Адиева Гюзелия Фаритовна – к.б.н., старший научный сотрудник химико-аналитического отдела ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии

человека», ул. Степана Кувыкина, д. 94, г. Уфа, 450106, Россия; e-mail: agyzelia@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2377-3471>

Аллаярова Гузель Римовна - к.б.н., старший научный сотрудник химико-аналитического отдела ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», ул. Степана Кувыкина, д. 94, г. Уфа, 450106, Россия; e-mail: guzel-all@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0838-3598>.

Зеленковская Евгения Евгеньевна - младший научный сотрудник химико-аналитического отдела ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», ул. Степана Кувыкина, д. 94, г. Уфа, 450106, Россия; e-mail: evgeniazelenkovskaya@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7682-2703>.

Author information:

Tatyana K. Larionova - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Leading Researcher at the Chemical and Analytical Department of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, 94 Stepan Kuvykin St., Ufa, 450106, Russia; e-mail: larionovatk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9754-4685>.

Maksim A. Ivashchenko, Head of the Department of Information Analysis, Researcher, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers; E-mail: ivachenko@ymrc.ru; ORCID iD: 0000-0003-1253-3202.

Rustem A. Daukaev - Candidate of Biological Sciences, Head of the Chemical and Analytical Department of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, 94 Stepan Kuvykin St., Ufa, 450106, Russia; e-mail: ufa.lab@yandex.ru ; <https://orcid.org/0000-0002-0421-4802> .

Elizaveta P. Artemenko - Researcher at the Yekaterinburg Medical Research Center for the Prevention and Health Protection of Industrial Workers, Rospotrebnadzor, 30 Popova St., Yekaterinburg, 620014, Russia; e-mail: artemenkoep@ymrc.ru ; <https://orcid.org/0000-0003-0125-0063>

Guzelia F. Adieva – PhD in Biology, Senior Researcher at the Chemical and Analytical Department of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, 94 Stepan Kuvykin St., Ufa, 450106, Russia; e-mail: agyzelia@mail.ru , <https://orcid.org/0000-0003-2377-3471>

Guzel R. Allayarova - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at the Chemical and Analytical Department of the Ufa Research Institute of Occupational

Health and Human Ecology, 94 Stepan Kuvykin St., Ufa, 450106, Russia; e-mail: guzel-all@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0003-0838-3598>

Evgeniya E. Zelenkovskaya, Junior Researcher at the Chemical Analytical Institute Department of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, 94 Stepan Kuvykin St., Ufa, 450106, Russia; e-mail: evgeniazelenkovskaya@yandex.ru ; <https://orcid.org/0000-0001-7682-2703>

Поступила/Received: 18.08.2026

Принята в печать/Accepted: 28.08.2026

УДК 614.31:664

ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ В РЕСПУБЛИКЕ БАШКОРТОСТАН

Бакиров А.Б.^{1,2,3}, Даукаев Р.А.¹, Ларионова Т.К.¹, Афонькина С.Р.¹, Аухадиева Э.А.¹, Курилов М.В.¹, Усманова Э.Н.¹

¹ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», Уфа, Россия

²ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации, Уфа, Россия

³Академия наук Республики Башкортостан, Уфа, Россия

Представлены итоги пятилетнего исследования гигиенической безопасности пищевой продукции в промышленном регионе, включающего оценку содержания консервантов, нитратов, массовой доли жирных кислот и их трансизомеров, химических элементов в основных группах пищевых продуктов, а также микробиологический контроль качества питьевой воды. С целью оптимизации надзорной деятельности обоснован перечень объектов внешнесредового мониторинга, включающий как номенклатуру пищевого сырья, так и типичные для него чужеродные вещества. Проведена количественная оценка вероятных неблагоприятных эффектов для здоровья населения.

Цель исследования - гигиеническая оценка загрязнённости пищевой продукции и питьевой воды, находящихся в обращении на территории Республики Башкортостан, для оптимизации региональной системы мониторинга.

Материалы и методы. Объектами исследования служили образцы местной и привозной пищевой продукции (n = 2959), входящей в рацион жителей Республики Башкортостан, образцы бутилированной и разливной питьевой воды из автоматов (n = 30). В токсикологическом эксперименте использованы разнополые белые аутбредные крысы (n = 40). Проведены физико-химические исследования основных видов пищевых продуктов массового потребления (n = 26039), микробиологические исследования питьевой воды (n = 180), токсикологические исследования на лабораторных животных (n = 80). Оценка риска воздействия химических контаминантов пищевых продуктов на население выполнена в соответствии с положениями Руководства по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания (Р 2.1.10.3968-23). Статистическая обработка данных проведена с использованием

критерия Краскела-Уоллиса (для множественных сравнений) и U-критерия Манна-Уитни (для попарных сравнений), различия считали значимыми при $p < 0,05$.

Результаты. Доля проб с превышением допустимых физико-химических параметров определена в 4,2%, при этом для молочных продуктов основным фактором риска стал жирнокислотный спектр, где процент браковки достиг 11,2%. По показателям безопасности установлено повышенное содержание нитратов (16,0% проб) и токсичных элементов (2,2% проб) в образцах овощной продукции из личных подсобных хозяйств. По микробиологическим показателям 46,7% проб воды из автоматов самообслуживания и питьевой бутилированной воды не соответствовали гигиеническим нормативам. Установлен приемлемый канцерогенный риск ($\Sigma CR = 3,92 \cdot 10^{-5}$) от перорального поступления мышьяка, свинца, кадмия и незначительность возникновения вредных неканцерогенных эффектов от поступления бензойной кислоты ($HQ = 0,10$) и нитратов ($HQ = 0,33$). Выявлен высокий неканцерогенный риск, обусловленный сочетанным воздействием мышьяка ($HQ = 6,53$) и марганца ($HQ = 3,41$), также поступающих с пищевой продукцией. Материалы проведенной работы позволяют с научных позиций обосновать комплекс мер по обеспечению гигиенической безопасности и корректировке системы государственного надзора, что создаёт предпосылки для эффективного управления рисками.

Ограничения исследования. Основные ограничения связаны с региональной локализацией, усреднёнными моделями питания, аналитическими ограничениями по идентификации жиров и коротким сроком токсикологического эксперимента.

Заключение. Результаты исследования позволили установить региональные особенности контаминации пищевой продукции, оценить риски для здоровья населения. Предложена методология установления приоритетных загрязнителей пищевых продуктов, уточнены механизмы токсикокинетики кадмия. Дальнейшие исследования должны быть направлены на расширение спектра контролируемых веществ, долгосрочные эксперименты и внедрение предиктивных цифровых моделей.

Ключевые слова: пищевые продукты, мониторинг, качество, безопасность, оценка риска, приоритетные контаминанты, тяжелые металлы, нитраты, здоровье населения

Соблюдение этических стандартов: все процедуры, связанные с использованием животных, были проведены в соответствии с рекомендациями «Правил и

международных рекомендаций Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях» (Страсбург, 1986), все эксперименты были рассмотрены и одобрены биоэтической комиссией ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека» Роспотребнадзора (протокол от 18.04.2024 № 02-04).

Использование инструментов искусственного интеллекта: авторы заявляют, что при подготовке настоящей рукописи системы искусственного интеллекта не применялись.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование осуществлялось в рамках реализации отраслевой научно-исследовательской программы Роспотребнадзора на 2021-2025 годы «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России» (рег. № НИОКТР 121062100054-0).

Для цитирования: Бакиров А.Б., Даукаев Р.А., Ларионова Т.К., Афонькина С.Р., Аухадиева Э.А., Курилов М.В., Усманова Э.Н. Гигиеническая характеристика качества и безопасности пищевой продукции в Республике Башкортостан. Медицина труда и экология человека. 2026; 3: 228 -246.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10312>

Для корреспонденции: Даукаев Рустем Аскарлович, e-mail: ufa.lab@yandex.ru

HYGIENIC CHARACTERISTICS OF THE QUALITY AND SAFETY OF FOOD PRODUCTS IN THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN

Bakirov A.B.^{1,2,3}, Daukayev R.A.¹, Larionova T.K.¹, Afonkina S.R.¹, Aukhadiyeva E.A.¹, Kurilov M.V.¹, Usmanova E.N.¹

¹ Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, Russia

² Bashkirian State Medical University of the Russian Health Ministry, Ufa, Russia

³ Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, Ufa, Russia

The results of a five-year study of the hygienic safety of food products in an industrial region are presented. The study included an assessment of the content of preservatives, nitrates, the mass fraction of fatty acids and their trans-isomers, and chemical elements in the main groups of food products, as well as microbiological monitoring of the quality

of drinking water. In order to optimize supervisory activities, a list of objects for environmental monitoring has been justified; it includes both the range of food raw materials and the foreign substances typical for them. A quantitative assessment of the likely adverse effects on public health has been carried out.

The purpose of the study: is to conduct a hygienic assessment of the contamination of food products and drinking water in circulation in the Republic of Bashkortostan in order to optimize the regional monitoring system.

Materials and methods. The objects of the study were samples of local and imported food products ($n = 2959$) included in the diet of residents of the Republic of Bashkortostan, samples of bottled and bottled drinking water from vending machines ($n = 30$). The toxicological experiment used heterosexual white outbred rats ($n = 40$). Physico-chemical studies of the main types of food products of mass consumption ($n = 26039$), microbiological studies of drinking water ($n = 180$), toxicological studies on laboratory animals ($n = 80$) were carried out. The assessment of the risk of exposure of chemical food contaminants to the population was carried out in accordance with the provisions of the Guidelines for Assessing the Risk to Public Health when Exposed to Chemicals Polluting the Environment (P 2.1.10.3968-23). Statistical data processing was carried out using the Kruskal–Wallis test (for multiple comparisons) and the Mann–Whitney U test (for pairwise comparisons); differences were considered significant at $p < 0.05$.

Results. The proportion of samples with exceeded permissible physicochemical parameters was determined to be 4.2%, while for dairy products, the main risk factor was the fatty acid spectrum, with the rejection rate reaching 11.2%. According to safety indicators, an increased content of nitrates (16.0% of samples) and toxic elements (2.2% of samples) was found in samples of vegetable products from private farms. According to microbiological indicators, 46.7% of water samples from self-service vending machines and bottled drinking water did not meet hygienic standards. An acceptable carcinogenic risk ($\sum CR = 3.92 \times 10^{-5}$) from oral intake of arsenic, lead, and cadmium and the insignificance of harmful non-carcinogenic effects from the intake of benzoic acid ($HQ = 0.10$) and nitrates ($HQ = 0.33$) have been established. A high non-carcinogenic risk was identified due to the combined effects of arsenic ($HQ = 6.53$) and manganese ($HQ = 3.41$), which also come from food products. The results of the study make it possible to scientifically substantiate a set of measures to ensure hygienic safety and to adjust the system of state supervision, which creates the prerequisites for effective risk management.

Study limitations. The main limitations are related to regional localization, averaged dietary models, analytical limitations in identifying fats, and the short duration of the toxicological experiment.

Conclusion. The study results made it possible to identify regional characteristics of food product contamination and assess the risks to public health. A methodology for identifying priority contaminants in food products has been proposed, and the mechanisms of cadmium toxicokinetics have been clarified. Further research should focus on expanding the range of monitored substances, conducting long-term experiments, and implementing predictive digital models.

Keywords: food products, monitoring, quality, safety, risk assessment, priority contaminants, heavy metals, nitrates, public health

Compliance with ethical standards: all procedures involving the use of animals were carried out in accordance with the recommendations of the «Rules and international recommendations of the European convention for the protection of vertebrate animals used for experimental and other scientific purposes» (Strasbourg, 1986); all experiments were reviewed and approved by the bioethics commission of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology of Rospotrebnadzor (protocol No. 02-04 dated 18.04.2024).

Declaration of AI use: the authors declare that no artificial intelligence tools were used in the preparation of this manuscript.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Funding: the study was conducted as part of the implementation of Rospotrebnadzor's sectoral research program for 2021-2025, «Scientific substantiation of the national system for ensuring sanitary and epidemiological well-being, managing health risks, and improving the quality of life of the Russian population» (registration No. research and development 121062100054-0).

For citation: Bakirov A.B., Daukayev R.A., Larionova T.K., Afonkina S.R., Aukhadiyeva E.A., Kurilov M.V., Usmanova E.N. Hygienic characteristics of the quality and safety of food products in the Republic of Bashkortostan. Occupational health and human ecology. 2026; 3: 228 -246.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10312>

For correspondence: Daukaev Rustem Askarovich, e-mail: ufa.lab@yandex.ru

Пищевая продукция отличается сложным многокомпонентным составом и включает в себя не только эссенциальные нутриенты, минорные биологически активные соединения, но также способна аккумулировать загрязнители естественного и техногенного генеза, обладающие токсическим потенциалом в отношении организма человека. Потенциально опасные контаминанты химического и биологического происхождения попадают и накапливаются в пищевых продуктах как на этапе сельскохозяйственного производства, так и при хранении, переработке и упаковке. Содержание чужеродных веществ в пищевых продуктах не всегда выходит за рамки нормативных показателей, однако в условиях повседневного рациона происходит систематическое поступление этих соединений в организм. В результате возникает синергический эффект, снижающий барьерные возможности человека при контакте с иными неблагоприятными факторами среды. Признание ВОЗ приоритетной роли мониторинговых процедур в оценке безопасности продовольственных товаров обуславливает включение данного направления в глобальные программы здорового питания. В свою очередь, в системе приоритетов российской государственной политики гигиенический контроль качества и безопасности пищевых продуктов занимает ключевую позицию, поскольку именно он создаёт предпосылки для санитарно-эпидемиологической защищённости населения [1-3].

Уровень продовольственной безопасности в каждом субъекте Российской Федерации определяется с учётом специфических особенностей, во многих регионах не введены обязательные правила для проверки сельскохозяйственной продукции непромышленного изготовления, предназначенной для продажи и личного потребления, выпадает из-под лабораторного контроля питьевая вода, реализуемая в автоматах самообслуживания, а в розничной сети выявляются образцы нестандартной и фальсифицированной пищевой продукции, что увеличивает риск здоровью населения от совокупного негативного воздействия токсикантов и микробных патогенов.

Своевременное выделение приоритетных критериев мониторинга пищевых продуктов остаётся насущной необходимостью. Это обусловлено стремлением повысить гибкость планирования санитарно-профилактических действий и результативность мер по минимизации вредного воздействия химических и микробиологических агентов на население. В Республике Башкортостан, обладающей мощным агропромышленным потенциалом и специфическими природно-климатическими характеристиками при развитой индустрии, перечисленные вопросы требуют первоочередного решения [4, 5].

Цель исследования: гигиеническая оценка загрязнённости пищевой продукции и питьевой воды, находящихся в обращении на территории Республики Башкортостан, для оптимизации региональной системы мониторинга.

В ходе проведения настоящей работы были выполнены следующие исследовательские задачи:

1. Выполнена санитарно-гигиеническая экспертиза контаминации пищевых продуктов, питьевой воды потенциально опасными химическими веществами и микроорганизмами.
2. Оценены риски химического загрязнения пищевых продуктов для населения, установлен перечень приоритетных контаминантов и ранжированы продуктовые группы по уровню потенциальной угрозы.
3. На примере токсичного элемента кадмия изучен метаболизм и изменение элементного гомеостаза при его хроническом поступлении с использованием экспериментальных моделей.
4. Подготовлены рекомендации для усовершенствования региональной системы социально-гигиенического мониторинга в части контроля контаминантов в пищевых продуктах.

Исследование согласуется с п. 21 (г) Указа Президента Российской Федерации от 28.02.2024 № 145 «О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» в части приоритетного направления обеспечивающего: переход к высокопродуктивному и экологически чистому агро- и аквахозяйству, разработку и внедрение систем рационального применения средств химической и биологической защиты сельскохозяйственных растений и животных, хранение и эффективную переработку сельскохозяйственной продукции, создание безопасных и качественных, в том числе, функциональных, продуктов питания.

Материалы и методы. Объектом исследования являлись образцы местной и привозной пищевой продукции, входящей в рацион жителей Республики Башкортостан, реализуемой в регионе питьевой воды. В токсикологическом эксперименте использовали разнополых белых аутбредных крыс.

Отбор проб осуществлен с учетом требований нормативно-технической документации на конкретный вид пищевого продукта. Аналитические исследования отобранных проб проводили в соответствии с действующими методическими указаниями и инструкциями по пробоподготовке и лабораторному контролю в аккредитованном Испытательном центре ФБУН «Уфимский НИИ

медицины труда и экологии человека» (уникальный номер записи об аккредитации в реестре аккредитованных лиц № РОСС RU.0001.510411).

Определено содержание сорбиновой и бензойной кислот (капиллярный электрофорез³⁸), нитратов (ионометрия³⁹), массовой доли жирных кислот и их трансизомеров (газовая хроматография^{40,41}), кадмия, свинца, мышьяка, ртути, алюминия, цинка, хрома, никеля, марганца, меди, железа (атомно-абсорбционная спектрометрия^{42,43,44,45}), а также исследованы микробиологические показатели питьевой воды - общее микробное число, бактерии группы кишечной палочки, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Enterococcus*, *Clostridium perfringens* (мембранная фильтрация^{46,47}).

Для токсико-гигиенической оценки воздействия произвольного суперэкоотоксиканта на организм проведено изучение накопления кадмия во внутренних органах лабораторных животных (печень, почки) при воздействии в дозе 1 мкг/кг массы тела в день, что соответствует допустимой дозе потребления данного элемента человеческой популяцией. Основная группа состояла из 20 крыс (2 подгруппы по 10 животных), которым ежедневно внутрижелудочно вводили водный раствор хлорида кадмия, контрольную группу, получающую дистиллированную воду, отобраны 20 особей разнополых белых аутбредных крыс. Воздействие кадмия в подгруппах оценивали через 60 и 90 дней. Животных выводили из эксперимента декапитацией, извлекали необходимые для анализа органы.

С целью гигиенической оценки загрязненности группы продуктов конкретным веществом и сравнения уровней контаминации различных групп продуктов, нами рассчитан коэффициент контаминации, позволяющий сопоставлять фактическое

³⁸ М 04-59-2009 «Продовольственное сырье и пищевые продукты, БАД. Методика измерений массовой доли консервантов (сорбиновой, бензойной кислот и их солей) и подсластителей (ацесульфама калия, сахараина и его солей) методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель» (издание 2014 года).

³⁹ МУ 5048-89 «Методические указания по определению нитратов и нитритов в продукции растениеводства».

⁴⁰ ГОСТ 31665-2012 «Масла растительные и жиры животные. Получение метиловых эфиров жирных кислот».

⁴¹ ГОСТ 32915-2014 «Молоко и молочная продукция. Определение жирнокислотного состава жировой фазы методом газовой хроматографии».

⁴² МУК 4.1.986-00 «Методика выполнения измерений массовой доли свинца и кадмия в пищевых продуктах и продовольственном сырье методом электротермической атомно-абсорбционной спектрометрии».

⁴³ ГОСТ 30178-96 «Сырье и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов».

⁴⁴ ГОСТ 31266-2004 «Сырье и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения мышьяка».

⁴⁵ ГОСТ 34427-2018 «Продукты пищевые и корма для животных. Определение ртути методом атомно-абсорбционной спектрометрии на основе эффекта Зеемана».

⁴⁶ МУК 4.2.3963-23 «Бактериологические методы исследования воды».

⁴⁷ Методические рекомендации. Обнаружение и идентификация *Pseudomonas Aeruginosa* в объектах окружающей среды (пищевых продуктах, воде, сточных жидкостях) / Минздрав СССР. - М., 1984 год.

содержание *i*-го вещества в пищевом продукте с его допустимым уровнем. Ранговое распределение приоритетных санитарно-химических и микробиологических токсикантов по степени риска для здоровья населения выполнено на основе разработанной 4-х балльной шкалы.

Оценка риска для здоровья населения выполнена в соответствии с положениями руководящего документа⁴⁸. Методологической основой для количественного определения уровней экспозиции послужил расчет средних суточных доз (LADD). Статистическая обработка первичных данных проведена с применением специализированного программного обеспечения для анализа «IBM SPSS Statistics» (версия 21.0). Для проверки статистической значимости различий между средними значениями в рамках соответствующих категорий пищевых продуктов был использован комплекс непараметрических методов, что обусловлено необходимостью проверки соответствия данных закону нормального распределения. Сравнение нескольких групп проводили с помощью критерия Краскела-Уоллиса, попарный анализ – с использованием U-критерия Манна-Уитни. Описание количественных данных выполнено с указанием среднего арифметического и стандартного отклонения. Различия считали статистически значимыми при уровне $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение. Анализ пяти различных видов пищевой продукции ($n = 200$), отобранных из продуктового ритейла, показал, что содержание широко применяемых консервантов - сорбиновой (E200) и бензойной (E210) кислот достигает 526 ± 74 мг/кг и 236 ± 33 мг/кг соответственно, и не превышает нормативных значений, установленных техническим регламентом⁴⁹. Несмотря на то, что внесение данных пищевых добавок при производстве соковой продукции запрещено, а использование бензойной кислоты в молочной промышленности не допустимо, в данных наименованиях продуктов обнаружены незначительные уровни консервантов - до 53 ± 7 мг/кг, что вероятно, обусловлено их естественным (природным) происхождением.

Определение количественного состава смеси жирных кислот в виде метиловых эфиров в четырех наименованиях продуктов из магазинов розничной торговли ($n = 107$) не выявило отклонений в пробах молока питьевого и молока сухого. В то же

⁴⁸ Р 2.1.10.3968-23 «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания».

⁴⁹ Технический регламент Таможенного союза «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств» (ТР ТС 029/2012), утвержденный решением Совета Евразийской экономической комиссии от 20.07.2012 № 58.

время несоответствия обнаружены в пробах сливочного масла (6,3% от общего количества исследованных проб), сметаны (5,9%), творога (4,2%), сгущенного молока (4,2%), сыра полутвердого (2,1%), кефира (2,1%). В данных нестандартных пробах молочных продуктов наблюдалось заниженное содержание масляной, капроновой, каприловой, миристиновой кислот, свойственных для молочного жира, и завышенное содержание пальмитиновой, олеиновой и линолевой кислот, что указывало на добавление растительных жиров. Среднее содержание транс-изомеров жирных кислот - элаидиновой (C18:1, транс-9) и линоэлаидиновой (C18:2, транс-9, транс-12) в проанализированных категориях продуктов составило $1,38 \pm 0,37\%$. Уровень трансжиров в жировой фазе образцов майонеза, маргаринов и спредов ($0,65 \pm 0,24\%$) не превышал 2,0% от общего содержания жира в продукте и соответствовал обязательным требованиям к масложировой продукции⁵⁰. Отдельные образцы кондитерских изделий, в частности шоколадные вафли ($14,86 \pm 1,10\%$) и молокосодержащей продукции - глазированные сырки ($5,93 \pm 0,42\%$), содержали более 2,0% трансизомеров жирных кислот, однако данная группа продуктов не входит в перечень нормируемых Техническим регламентом по этому показателю.

Исследования показали значительные региональные и сезонные колебания уровня нитратов в продукции растениеводства ($n = 238$) из личных подсобных хозяйств, выращенных в десяти различных районах Республики Башкортостан. Среднее содержание нитратов в образцах картофеля составило 83 ± 17 мг/кг, моркови - 111 ± 16 мг/кг, столовой свеклы - 1014 ± 117 мг/кг, что соответствовало норме⁵¹, средний уровень нитратов в образцах капусты белокочанной составил 634 ± 198 мг/кг при допустимом - 500 мг/кг. Мониторинг содержания нитратов в плодоовощной продукции из розничной торговой сети ($n = 126$) не выявил превышений нормативных требований, сравнительный анализ сезонной динамики установил достоверную изменчивость содержания нитратов в образцах огурцов ($F=19,694$; $p=0,0001$), картофеля ($F=14,316$; $p=0,0001$), столовой свеклы ($F=12,961$; $p=0,0001$) и капусты ($F=67,631$; $p=0,0001$) с максимальными значениями в летне-осенний период.

Оценка элементного состава десяти наименований пищевой продукции ($n = 2288$) показала, что средние значения концентраций токсичных элементов (Pb, Cd, As, Hg) в большинстве проанализированных образцов соответствуют установленным

⁵⁰ Технический регламент Таможенного союза «Технический регламент на масложировую продукцию» (ТР ТС 024/2011), утвержденный решением Комиссии Таможенного союза от 09.12.2011 № 883.

⁵¹ Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011), утвержденный решением Комиссии Таможенного союза от 09.12.2011 № 880.

гигиеническим нормативам¹⁴. Наибольшее количество нестандартных проб с превышением допустимого уровня (далее - ДУ) выявлено в растениеводческой продукции, отобранной в личных подсобных хозяйствах: уровень свинца в образцах картофеля достигал $1,20 \pm 0,35$ мг/кг (2,2 ДУ), в корнеплодах моркови - $0,50 \pm 0,18$ мг/кг (верхняя граница ДУ), содержание кадмия в пробах капусты белокочанной достигало $0,30 \pm 0,11$ мг/кг (10 ДУ), в корнеплодах столовой свеклы - $0,042 \pm 0,016$ мг/кг и в картофеле - $0,043 \pm 0,016$ мг/кг, что выше нормативного значения в 1,4 раза. Кроме того, в отдельных пробах хлебобулочных изделий зафиксировано превышение допустимого уровня кадмия до 2 раз, а в кулинарных - до 1,5 раз.

Наиболее высокие значения ртути и мышьяка установлены в образцах рыбы. Среднее содержание ртути в образцах пресноводной хищной рыбы составило $0,98 \pm 0,20$ мг/кг (1,6 ДУ), в остальных категориях уровень находился в допустимом диапазоне: $0,18 \pm 0,05$ мг/кг в пресноводной нехищной и $0,11 \pm 0,03$ мг/кг в морской рыбе.

Результаты исследования других микроэлементов, нормируемых в отдельных группах пищевых продуктов или не нормируемых в настоящее время, показали, что пищевая продукция, подвергнутая обработке, содержит больше алюминия. Установлено, что при диапазоне концентрации металла в мясной продукции 0,2-0,8 мг/кг, в некоторых видах фарша его уровень составляет 4,2-7,3 мг/кг, предположительно это обусловлено внесением содержащих алюминий добавок или применением технологического оборудования с алюминиевыми деталями. Максимальный средний уровень условно-эссенциального никеля обнаружен в овощах и картофеле ($0,25 \pm 0,02$ мг/кг) из личных подсобных хозяйств, концентрация хрома выше всего в образцах фруктов ($0,31 \pm 0,20$ мг/кг) и кондитерских изделий ($0,30 \pm 0,08$ мг/кг) из продуктового ритейла, содержание эссенциальных элементов (железо, медь, цинк, марганец) в пищевых продуктах оказалось ниже приводимых в литературе среднероссийских данных [6].

Изучение кинетики и биораспределения кадмия в организме лабораторных животных при введении металла в субтоксических дозах, сопоставимых с предельно допустимыми уровнями для человеческой популяции, выявило значительное накопление данного токсиканта в ключевых органах детоксикации - печени и почках. Концентрации кадмия в этих органах превышали контрольные показатели в 2-4 раза ($p=0,001$), что свидетельствует о высокой степени кумуляции металла и его потенциальной токсичности даже при низких экспозиционных

уровнях. Полученные результаты подчеркивают необходимость ужесточения мониторинга содержания кадмия в пищевых продуктах и внедрения более строгих регуляторных мер для предотвращения его аккумуляции в организме человека.

На основании данных о среднелюдском потреблении основных продуктов в регионе [7, 8] и результатов количественных исследований были рассчитаны суточные дозы перорального поступления бензойной кислоты, нитратов, химических элементов и уровни хронического неканцерогенного риска.

Результаты анализа выявили высокий неканцерогенный риск, обусловленный сочетанным воздействием мышьяка ($HQ=6,53$), марганца ($HQ=3,41$) и незначительность возникновения вредных неканцерогенных эффектов от перорального поступления бензойной кислоты ($HQ=0,10$) и нитратов ($HQ=0,33$) с пищевыми продуктами. Уровень риска развития неканцерогенных эффектов для веществ одностороннего действия, рассчитанный через индекс опасности, показал, что наибольшему риску развития неблагоприятных эффектов подвержены нервная и сердечно-сосудистая системы, органы дыхания и кожа, а также развитие детей ($HI = 6,529-10,046$). Риск развития вредных эффектов для иммунной системы, желудочно-кишечного тракта, почек и крови был весьма малым ($HI = 0,106-0,244$).

Оценка канцерогенного риска проведена при пероральном поступлении свинца, кадмия, мышьяка. Расчёты показали, что индивидуальный канцерогенный риск перорального поступления данных токсикантов с пищевыми продуктами, а также суммарный риск не превышают допустимого уровня и составляют от 0,35 по свинцу до 34,3 по мышьяку дополнительных случаев рака на 1 млн человек в течение всей жизни. Показатель популяционного канцерогенного риска для населения Республики Башкортостан, связанный с алиментарным поступлением мышьяка, свинца, кадмия составил 158 дополнительных случаев.

Микробиологический анализ выявил нестандартные пробы бутилированной питьевой воды, в единичных образцах обнаружены устойчивые к обеззараживанию микроорганизмы (споры сульфитредуцирующих клостридий). Вода питьевая на розлив из водоматов имеет приемлемые показатели по ОМЧ, но в ней присутствуют опасные бактерии - кишечная и синегнойная палочки. В отличие от них, бутилированная вода для детского питания по исследованным микробиологическим показателям соответствует норме. Её высокое качество подтверждает, что при должном контроле на всех этапах производства можно обеспечить безопасность продукта.

Примененный метод балльных оценок позволил ранжировать загрязнители по степени гигиенической опасности с учетом как их специфических особенностей действия на организм, что отражено в коэффициенте класса опасности⁵², так и фактическим уровнем загрязнения пищевой продукции, определяемым кратностью превышения установленных регламентов. Ранг приоритетности физико-химических показателей для оценки качества и безопасности пищевой продукции располагается в следующем порядке: кадмий > нитраты > мышьяк > свинец > ртуть > бензойная кислота > сорбиновая кислота. Наиболее приоритетными для микробиологического контроля качества питьевой воды являются: кишечная палочка > синегнойная палочка > энтерококки > споры сульфитредуцирующих клостридий. На основании проведенных исследований составлен список продуктов, которые в первую очередь подлежат мониторингу на территории региона по критериям качества и безопасности, схема представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Перечень пищевой продукции, подлежащей первоочередному мониторингу по показателям качества и безопасности

Figure 1. List of food products subject to priority monitoring in terms of quality and safety indicators

Вошедшие в данный список группы пищевой продукции согласуются с перечнем продукции, подлежащей государственному контролю, утвержденным Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека

⁵² ГОСТ 12.1.007-76 «Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности», введенный постановлением Госстандарта СССР от 10.03.1976 № 579.

от 26.09.2023 и относятся к категориям со значительным, высоким и чрезвычайно высоким риском причинения вреда здоровью населения.

Результаты исследовательской работы позволяют предложить ряд мер, направленных на повышение эффективности региональной системы контроля безопасности пищевой продукции:

1. Внедрить целевую региональную программу мониторинга с акцентом на приоритетные контаминанты (кадмий, свинец, нитраты, мышьяк, ртуть) и группы продуктов высокого риска (овощная продукция из личных подсобных хозяйств, рыба пресноводных водоёмов, хлебобулочные изделия, молочная продукция, а также питьевая вода из автоматов самообслуживания).
2. Обеспечить доступный экспресс-контроль продукции, производимой в личных хозяйствах, и воды, реализуемой в розлив, в том числе с использованием мобильных лабораторных комплексов, для информирования населения и предотвращения оборота небезопасной продукции.
3. Применять риск-ориентированный подход при организации государственного надзора за производством и оборотом пищевой продукции, в том числе, на предприятиях общественного питания, с учетом характеристики и уровня опасности, вероятности возникновения рисков событий.
4. Проводить систематическую информационно-разъяснительную работу с производителями сельскохозяйственной продукции и населением по вопросам рационального применения удобрений и средств защиты растений, а также по способам снижения нитратов и токсичных элементов в продуктах при хранении и кулинарной обработке.

Заключение. Выполненные нами исследования подчеркивают актуальность проведения мониторинга качества и безопасности пищевой продукции на территории Республики Башкортостан по следующим показателям и наименованиям продуктов: жирнокислотный состав в молочной продукции; массовая доля трансизомеров ненасыщенных жирных кислот в кондитерских изделиях; кадмий, свинец, нитраты в растениеводческой продукции; *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Enterococcus*, *Clostridium perfringens* в питьевой воде из водоматов самообслуживания.

Результаты эксперимента свидетельствуют, что при хроническом поступлении кадмия в дозах, сопоставимых с референтными для человека, происходит

достоверная аккумуляция металла в печени и почках. Это обосновывает особую значимость контроля кадмия в пищевых продуктах: из-за высокой токсичности и кумулятивного эффекта даже незначительное превышение фоновых уровней может нести угрозу здоровью населения, что требует приоритетного включения кадмия в региональные программы мониторинга.

Разработанные подходы к систематизации показателей качества и безопасности пищевых продуктов, предложенные практические рекомендации ориентированы на повышение эффективности социально-гигиенического мониторинга и снижение вероятности неблагоприятных последствий для здоровья населения от употребления недоброкачественных продуктов.

Вклад авторов:

Концепция и дизайн исследования - Бакиров А.Б., Ларионова Т.К.

Сбор и обработка материала - Аухадиева Э.А., Курилов М.В., Афонькина С.Р., Усманова Э.Н.

Анализ данных - Даукаев Р.А., Ларионова Т.К., Аухадиева Э.А., Курилов М.В., Афонькина С.Р., Усманова Э.Н.

Написание текста и оформление статьи - Бакиров А.Б., Даукаев Р.А.

Редактирование - Бакиров А.Б., Даукаев Р.А., Ларионова Т.К.

Все соавторы - утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех ее частей.

Author contribution:

Concept and design of the study - Bakirov A.B., Larionova T.K.

Collection and processing of material - Aukhadieva E.A., Kurilov M.V., Afonkina S.R., Usmanova E.N.

Data analysis - Daukaev R.A., Larionova T.K., Aukhadieva E.A., Kurilov M.V., Afonkina S.R., Usmanova E.N.

Writing the text designing the article - Bakirov A.B., Daukaev R.A.

Editing - Bakirov A.B., Daukaev R.A., Larionova T.K.

All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Список литературы:

1. Распоряжение Правительства РФ от 29.06.2016 № 1364-р «Об утверждении Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года». Собрание законодательства Российской Федерации. 2016; 28. Ст. 4758.
2. Указ Президента Российской Федерации от 21.01.2020 № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации». Собрание законодательства Российской Федерации. 2020; 4. Ст. 345.
3. Руководство по глобальному мониторингу здорового питания. Женева: Всемирная организация здравоохранения, Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций и Детский фонд Организации Объединенных Наций. 2024: 40 с. DOI:10.4060/cd0961ru
4. Семин А. Н., Рущицкая О. А., Гусманов Р. У., Стомба Е. В. Комплексная оценка продовольственного обеспечения населения Республики Башкортостан в условиях новых системных вызовов. Аграрный вестник Урала. 2023; 23(09):138-148. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-23-09-138-148.
5. Вартанова М.Л. Кластерный анализ продовольственной безопасности России с учетом демографических профилей регионов. Регионология. 2026; 34 (2):305-327. DOI: 10.15507/2413-1407.26342.305-327.
6. Скурихин И.М., Тутельян В.А. Химический состав российских пищевых продуктов. М.: ДеЛи принт. 2002: 236 с.
7. Ларионова Т.К., Бакиров А.Б., Даукаев Р.А. Оценка питания взрослого населения Республики Башкортостан. Вопросы питания. 2018; 87(5): 37-42. DOI: 10.24411/0042-8833-2018-10051.
8. Зеленковская Е.Е., Ларионова Т.К., Даукаев Р.А., Мусабилов Д.Э., Аллаярова Г.Р., Афонькина С.Р., Фазлыева А.С., Аухадиева Э.А., Курилов М.В. Анализ фактического питания учащихся младшего школьного возраста Республики Башкортостан. Гигиена и санитария. 2022; 101(12): 1562-1567. DOI: 10.47470/0016-9900-2022-101-12-1562-1567.

References:

1. Government of the Russian Federation. On approving the Strategy for improving the quality of food products in the Russian Federation until 2030 (Directive No. 1364-r, June 29, 2016). Collection of Legislation of the Russian Federation. 2016;(28):Art. 4758.

2. President of the Russian Federation. On approving the Food Security Doctrine of the Russian Federation (Decree No. 20, January 21, 2020). Collection of Legislation of the Russian Federation. 2020;(4):Art. 345.
3. Guidance for monitoring healthy diets globally. Geneva: World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations, and United Nations Children's Fund; 2024. 40 p. DOI:10.4060/cd0961ru.
4. Semin A.N., Rushchitskaya O.A., Gusmanov R.U., Stovba E.V. Comprehensive assessment of food supply to the population of the Republic of Bashkortostan in the context of new systemic challenges. Agrarian Bulletin of the Urals. 2023;23(9):138-148. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-23-09-138-148.
5. Vartanova M.L. Cluster analysis of Russia's food security taking into account the demographic profiles of the regions. Regionology. 2026;34(2):305-327. DOI: 10.15507/2413-1407.26342.305-327.
6. Skurikhin I.M., Tutelian V.A. Chemical composition of Russian food products. Moscow: DeLi print; 2002. 236 p.
7. Larionova T.K., Bakirov A.B., Daukaev R.A. Nutritional assessment of adult population of the Republic of Bashkortostan. Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]. 2018;87(5):37–42. DOI: 10.24411/0042-8833-2018-10051.
8. Zelenkovskaya E.E., Larionova T.K., Daukaev R.A., Musabirov D.E., Allayarova G.R., Afonkina S.R., Fazlieva A.S., Aukhadieva E.A., Kurilov M.V. Analysis of the actual nutrition in primary school students of the Republic of Bashkortostan. Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal). 2022; 101(12): 1562-1567. DOI:10.47470/0016-9900-2022-101-12-1562-1567.

Информация об авторах

Бакиров Ахат Бариевич - д.м.н., проф., советник директора ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», заведующий кафедрой терапии и профессиональных болезней с курсом института последипломного образования ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, академик Академии наук Республики Башкортостан, e-mail: akhatb@bk.ru, ORCID iD: 0000-0003-3510-2595.

Даукаев Рустем Аскарлович - к.б.н., заведующий химико-аналитическим отделом ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail: ufa.lab@yandex.ru, ORCID iD: 0000-0002-0421-4802.

Ларионова Татьяна Кенсариновна - к.б.н., доцент, ведущий научный сотрудник химико-аналитического отдела ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail: larionovatk@yandex.ru, ORCID iD: 0000-0001-9754-4685.

Афонькина Светлана Разифовна - к.х.н., старший научный сотрудник химико-аналитического отдела ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail: svetafonk@mail.ru, ORCID iD: 0000-0003-0445-9057

Аухадиева Эльвира Ахатовна - младший научный сотрудник химико-аналитического отдела ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail: phytoufa@yandex.ru, ORCID iD: 0000-0002-6793-6992.

Курилов Михаил Викторович - младший научный сотрудник химико-аналитического отдела ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail: golovenco@mail.ru, ORCID iD: 0000-0002-2818-1558

Усманова Эльза Наильевна - младший научный сотрудник химико-аналитического отдела ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail: elza90@inbox.ru, ORCID iD: 0000-0002-5455-6472

Author information

Akhat B. Bakirov - Dr. Sci. (Med.), professor, advisor to the director of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Head of the Department of Therapy and Occupational Diseases with a course at the Institute of Postgraduate Education of the Bashkirian State Medical University of the Russian Health Ministry, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, e-mail: akhatb@bk.ru, ORCID: 0000-0003-3510-2595.

Rustem A. Daukayev - Cand. Sci. (Biol.), head of the chemical and analytical department of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail: ufa.lab@yandex.ru, ORCID iD: 0000-0002-0421-4802.

Tatyana K. Larionova - Cand. Sci. (Biol.), associate professor, leading researcher of the chemical and analytical department of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail: larionovatk@yandex.ru, ORCID iD: 0000-0001-9754-4685.

Svetlana R. Afonkina - Cand. Sci. (Chem.), senior researcher of the chemical and analytical department of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail: svetafonk@mail.ru, ORCID iD: 0000-0003-0445-9057.

Elvira A. Aukhadiyeva - junior researcher of the chemical and analytical department of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail: phytoufa@yandex.ru, ORCID iD: 0000-0002-6793-6992.

Mikhail V. Kurilov - junior researcher of the chemical and analytical department of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail: golovenco@mail.ru, ORCID iD: 0000-0002-2818-1558.

Elza N. Usmanova - junior researcher of the chemical and analytical department of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail: elza90@inbox.ru, ORCID iD: 0000-0002-5455-6472.

Поступила/Received: 24.08.2026

Принята в печать/Accepted: 27.08.2026

УДК 615.9

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗДРАЖАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ НА КОЖУ И СЛИЗИСТЫЕ ОБОЛОЧКИ ГЛАЗ НА ПРИМЕРЕ QSAR-СИСТЕМЫ OECD QSAR TOOLBOX

Хамидулина Х.Х.^{1,2}, Тарасова Е.В.¹, Горбунова Д.И.¹, Замкова И.В.¹

¹Научный информационно-аналитический центр «Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ» ФБУН «Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, Москва, Российская Федерация;

²ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Российская Федерация

Объектом исследования являлась прогностическая способность QSAR-системы OECD QSAR Toolbox при оценке раздражающего действия химических веществ на кожу и слизистые оболочки глаз.

Цель исследования: оценить прогностическую способность методов *in silico* для определения раздражающего действия химических веществ на кожу и слизистые оболочки глаз на примере программного обеспечения OECD QSAR Toolbox.

Материалы и методы. Исследование выполнено с использованием OECD QSAR Toolbox версии 4.8.2. Сформированы выборки из 130 веществ для оценки воздействия на кожу и 90 веществ - на слизистые оболочки глаз. В группу веществ с подтвержденным эффектом включали соединения 2 класса опасности по СГС. Аналоги подбирали последовательно с применением специфических и неспецифических профилировщиков. Прогноз сопоставляли с экспериментальными данными. Рассчитывали точность, чувствительность, специфичность и, дополнительно для качественных показателей, сбалансированную точность.

Результаты. При оценке раздражающего воздействия на кожу точность прогноза наличия или отсутствия раздражающего действия составила 73,2%. Для слизистых оболочек глаз точность прогнозирования наличия или отсутствия раздражающего действия - 59,0%. Значения сбалансированной точности достигали или превышали ориентировочный уровень 70%.

Заключение. Полученные результаты подтверждают возможность применения OECD QSAR Toolbox для предварительной скрининговой оценки раздражающего действия химических веществ.

Ключевые слова: раздражающее действие, OECD QSAR Toolbox; методы *in silico*; QSAR; расчетный метод

Соблюдение этических стандартов: проведение настоящего исследования не требовало одобрения этического комитета, поскольку работа не связана с использованием человека или животных в качестве объектов исследования.

Использование инструментов искусственного интеллекта: авторы заявляют, что при подготовке настоящей рукописи системы искусственного интеллекта не применялись.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование выполнено в рамках научно-исследовательской работы «Научное обоснование использования альтернативных методов (*in silico*) для прогноза опасности химических веществ» в соответствии с комплексом процессных мероприятий «Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в целях обеспечения химической и биологической безопасности Российской Федерации» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации»

Для цитирования: Хамидулина Х.Х., Тарасова Е.В., Горбунова Д.И., Замкова И.В. Прогнозирование раздражающего действия химических веществ на кожу и слизистые оболочки глаз на примере QSAR-системы OECD QSAR TOOLBOX. Медицина труда и экология человека. 2026; 3 : 247-269.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10313>

Для корреспонденции: Халидя Хизбулаевна Хамидулина, e-mail: khalidiya@yandex.ru

PREDICTING THE IRRITANT EFFECTS OF CHEMICALS ON THE SKIN AND EYE MUCOUS MEMBRANES USING THE OECD QSAR TOOLBOX

Khamidulina Kh.Kh.^{1,2}, Tarasova E.V.¹, Gorbunova D.I.¹, Zamkova I.V.¹

¹ Scientific Information and Analytical Center "Russian Register of Potentially Hazardous Chemical and Biological Substances" of the F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Rospotrebnadzor, Moscow, Russian Federation

² Russian Medical Academy of Continuous Professional Education of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

The predictive capability of the OECD QSAR system QSAR Toolbox for assessing the irritant effects of chemicals on the skin and eye mucous membranes.

The purpose of the study. To evaluate the predictive capability of *in silico* methods for determining the irritant effects of chemicals on the skin and eye mucous membranes using the OECD QSAR Toolbox software.

Materials and Methods. The study was conducted using the OECD QSAR Toolbox, version 4.8.2. Samples were compiled consisting of 130 substances to assess effects on the skin and 90 substances for effects on the eye mucous membranes. The group of substances with a confirmed effect included compounds of hazard class 2 according to the GHS. Analogues were selected sequentially using specific and non-specific profilers. The predictions were compared with experimental data; for quantitative endpoints, a match was considered to be a deviation of no more than 0.5 points. Accuracy, sensitivity, specificity, and, additionally for qualitative indicators, balanced accuracy were calculated.

Results. When assessing the irritant effect on the skin, the prediction accuracy for the presence or absence of an irritant effect - 73.2 %. For the eye mucous membranes, the prediction accuracy for the presence or absence of an irritant effect – 59.0%. The balanced accuracy values reached or exceeded the approximate level of 70 %.

Conclusion. The obtained results confirm the feasibility of using the OECD QSAR Toolbox for preliminary screening assessment of the irritant effects of chemicals.

Keywords: irritant effect; OECD QSAR Toolbox; *in silico* methods; QSAR; calculation method

Compliance with ethical standards: This study did not require approval by the Ethics Committee, as it did not involve humans or animals as research subjects.

Declaration of AI use: The authors declare that no artificial intelligence tools were used in the preparation of this manuscript.

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

Funding. The study was carried out within the framework of the research project "Scientific justification for the use of alternative (*in silico*) methods for predicting the hazard of chemicals" in accordance with the set of process measures "Research and

development work to ensure chemical and biological safety of the Russian Federation" under the state program of the Russian Federation "Scientific and Technological Development of the Russian Federation".

For citation: Khamidulina Kh.Kh., Tarasova E.V., Gorbunova D.I., Zamkova I.V. Predicting the irritant effects of chemicals on the skin and eye mucous membranes using the OECD QSAR Toolbox. Occupational health and human ecology. 2026; 3:247-269.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10313>

For correspondence: Khalidya Kh. Khamidulina, e-mail: khalidiya@yandex.ru.

Изучение раздражающего действия на кожу и слизистые оболочки глаз является обязательной составляющей токсикологической оценки химических веществ. [1, 5, 6]

На протяжении многих десятилетий приоритетными в отечественной профилактической токсикологии являлись методы исследования *in vivo*. В настоящее время альтернативные методы исследования находят все большее применение, особенно при оценке раздражающего действия на кожу и глаза. Принимая во внимание стоимость и длительность исследований *in vivo* и *in vitro*, в ряде случаев методы *in silico* могут служить полезным инструментом для скрининговой оценки токсичности и опасности химических веществ. [2-4] Их применение законодательно закреплено в техническом регламенте ТР ЕАЭС 041/2017 «О безопасности химической продукции» и ТР РФ «О безопасности химической продукции», утвержденном постановлением Правительства РФ от 3 июня 2026 г. № 688 «О техническом регулировании химической продукции».

В последние годы опубликован ряд исследований, посвящённых оценке возможности применения методов *in silico* для прогнозирования раздражающего и коррозионного действия химических веществ на кожу и слизистые оболочки глаз [10-17]. Они охватывают различные подходы к прогнозированию раздражающего и коррозионного действия, включая определение наличия или отсутствия эффекта, степень его выраженности и классификацию химических веществ по классам опасности в соответствии с СГС (Согласованная на глобальном уровне система классификации и маркировки химических веществ). G.R. Verheyen и соавт. исследовали прогностическую способность существующих программных систем Derek Nexus, Toxtree и Case Ultra путем сопоставления результатов расчета с экспериментальными данными по раздражающему и коррозионному действию на кожу и глаза [11]. L. Geerts и соавт. провели аналогичную оценку при

прогнозировании воздействия на глаза с использованием Toxtree и моделей Case Ultra [12]. Р. Di и соавт. для прогнозирования раздражающего и коррозионного действия на слизистые оболочки глаз использовали алгоритмы машинного обучения с объединением результатов нескольких расчетных моделей [16].

Показатели прогностической способности, представленные в отдельных исследованиях, существенно различаются в зависимости от оцениваемой конечной точки, характеристик соединений в исследуемых выборках и применяемых методов расчета [10-17].

Одним из программных средств, используемых для *in silico* оценки токсических свойств химических веществ, является бесплатное программное обеспечение OECD QSAR Toolbox, в котором интегрированы различные профилировщики и QSAR-модели (QSAR - качественное соотношение «структура-активность» (англ. Structure-Activity Relationship), разработанные ведущими международными исследовательскими центрами. OECD QSAR Toolbox не только содержит значительный объем данных (более 63 баз данных, более 3,3 млн. экспериментальных значений для более чем 142,5 тыс. химических веществ), но и обеспечивает прозрачность при проведении расчетов. В отечественной профилактической токсикологии OECD QSAR Toolbox ранее применялся для прогнозирования других токсикологических и экотоксикологических показателей. [8, 9]

Целью данного исследования являлась оценка прогностической способности методов *in silico* для определения раздражающего действия химических веществ на кожу и слизистые оболочки глаз на примере программного обеспечения OECD QSAR Toolbox.

Материалы и методы. Работа выполнена с использованием программного обеспечения OECD QSAR Toolbox версии 4.8.2, руководящих документов ОЭСР (Организация экономического сотрудничества и развития) по оценке раздражающего и коррозионного действия химических веществ на кожу и слизистые оболочки глаз.

Для оценки прогностической способности программы были сформированы выборки хорошо изученных химических веществ различных классов, включая спирты, фенолы, альдегиды, кетоны, простые и сложные эфиры, карбоновые кислоты, акрилаты и метакрилаты, амины, изоцианаты, эпоксидные, галоген-, серо- и фосфорсодержащие соединения и др. В выборку для оценки раздражающего действия на кожу включено 130 химических веществ, для оценки

воздействия на слизистые оболочки глаз - 90 соединений. В выборки веществ с подтверждённым эффектом включали соединения, отнесенные ко 2 классу опасности в соответствии с СГС по соответствующему виду воздействия. Выбор данного класса обусловлен сложностью интерпретации экспериментальных данных при оценке обратимого раздражающего действия. [1, 18, 19]

Критериями включения веществ в выборки являлись:

- наличие экспериментальных данных, полученных в соответствии с методами ОЭСР;
- наличие классификации по СГС в официальных национальных классификациях других стран;
- возможность идентификации химического вещества в программе;
- принадлежность химического вещества к группе органических соединений с учетом ограничений используемого программного обеспечения.

Для оценки прогностической способности OECD QSAR Toolbox использовали экспериментальные данные о раздражающем и коррозионном действии химических веществ, представленные в официальных информационных источниках: АРИПС (автоматизированная распределенная информационно-поисковая система «Опасные вещества»), ЕСНА (Европейское химическое агентство (англ. European Chemicals Agency)), EPA (Агентство по охране окружающей среды США (англ. United States Environmental Protection Agency)), NITE (Национальный институт технологий и оценки Японии (англ. National Institute of Technology and Evaluation)), FDA (Управление по контролю за качеством пищевых продуктов и лекарственных средств США (англ. Food and Drug Administration)), IPCS (INCHEM) (Международная программа по химической безопасности (англ. International Programme on Chemical Safety)), международный информационный ресурс по химической безопасности, GHS-J (результаты классификации химических веществ по СГС, подготовленные правительством Японии) и OECD (Организация экономического сотрудничества и развития). Основу информации по оцениваемым показателям составляли результаты исследований, выполненных в соответствии с ГОСТ 32436-2020 «Оценка острого раздражения/разъедания (коррозии) кожи» (метод ОЭСР TG № 404) и ГОСТ 34658-2020 «Оценка раздражающего/разъедающего воздействия на глаза» (метод ОЭСР TG № 405). [18, 19] При проведении расчетов в OECD QSAR Toolbox выполнялся поиск

сведений по выбранной конечной точке для исследуемого вещества и аналогов в базах данных, включающих результаты экспериментов *in vivo* и *in vitro*.

При прогнозировании раздражающего действия в OECD QSAR Toolbox в качестве конечной точки расчета могут использоваться качественные и количественные показатели. В настоящем исследовании при оценке раздражающего действия на кожу использовали показатели: отек кожи (англ. edema score), эритема кожи (англ. erythema score) и раздражение/коррозия кожи (англ. skin irritation/corrosion). При оценке воздействия на слизистые оболочки глаз использовали: изменения конъюнктивы (англ. conjunctivae score), хемоз (англ. chemosis score), покраснение радужной оболочки (англ. iris score), помутнение роговицы (англ. cornea opacity score) и раздражение/коррозия глаз (англ. eye irritation/corrosion).

Для подбора структурно близких химических веществ-аналогов по выбранной конечной точке использовали профилировщики OECD QSAR Toolbox.

Профилировщик «Skin irritation/corrosion Inclusion rules by BfR» представляет собой 40 органических структурных фрагментов, предназначенных для идентификации химических соединений, обладающих потенциалом раздражающего или коррозионного действия в отношении кожи. [20, 21] Профилировщик «Eye irritation/corrosion Inclusion rules by BfR» включает 17 структурных фрагментов, используемых для идентификации химических соединений, обладающих потенциалом раздражающего или коррозионного действия на глаза. [22]

Критерии исключения раздражающего действия химических веществ на кожу и слизистые оболочки глаз реализованы в профилировщиках: «Skin irritation/corrosion Exclusion rules by BfR»; «Eye irritation/corrosion Exclusion rules by BfR». [20, 21, 22] Данные профилировщики представлены в таблице 1.

Таблица 1. Профилировщики «Eye/skin irritation/corrosion Exclusion rules by BfR».

Table 1. Profilers «Eye/skin irritation/corrosion Exclusion rules by BfR».

Класс веществ	Критерии исключения раздражающего/коррозионного действия на кожу	Критерии исключения раздражающего/коррозионного действия на слизистые оболочки глаз
Все вещества	Растворимость в жирах <0,01 г/кг	Растворимость в воде <0,000005 г/л Растворимость в воде <0,00002

	log Kow <-3,1 log Kow >9 Температура плавления >200 °C	г/л Растворимость в жирах <0,01 г/кг log Kow <-3,1 log Kow >9 Температура плавления >200 °C Молекулярная масса >650 г/моль
С (атомы С, Н, О)	Растворимость в воде <0,0001 г/л Температура плавления >55 °C Молекулярная масса >350 г/моль Поверхностное натяжение >62 мН/м Давление паров <0,0001 Па	Растворимость в воде <0,0001 г/л Растворимость в воде <0,0005 г/л Температура плавления >55 °C Молекулярная масса >380 г/моль
CN (атомы С, Н, О, N)	Растворимость в воде <0,0001 г/л Растворимость в воде <0,1 г/л Растворимость в жирах <0,4 г/кг log Kow >4,5 log Kow >5,5 Температура плавления >180 °C Молекулярная масса >290 г/моль Молекулярная масса >540 г/моль Давление паров <0,001 Па	Растворимость в воде <0,1 г/л Растворимость в жирах <0,4 г/кг log Kow >4,5 Молекулярная масса >290 г/моль
CNHal (атомы С, Н, О, N, Hal)	Растворимость в воде <0,001 г/л Растворимость в воде <0,1 г/л	Растворимость в воде <0,004 г/л Растворимость в воде <0,1 г/л

галогены)	Растворимость в жирах <4 г/кг Растворимость в жирах <400 г/кг $\log Kow > 3,8$ Молекулярная масса >370 г/моль Молекулярная масса >380 г/моль	Растворимость в жирах <400 г/кг $\log Kow > 3,8$ Молекулярная масса >370 г/моль
CNS (атомы C, H, O, N, S)	$\log Kow < 0,5$ $\log Kow < -2$ Температура плавления >50 °C Температура плавления >120 °C Молекулярная масса >620 г/моль Поверхностное натяжение >62 мН/м	Растворимость в воде <0,006 г/л $\log Kow < -2$ $\log Kow > 1,5$ $\log Kow > 3,6$ Температура плавления >50 °C Температура плавления >200 °C Молекулярная масса >620 г/моль
CHal (атомы C, H, O, галогены)	$\log Kow > 4,5$ Температура плавления >65 °C Молекулярная масса >280 г/моль Молекулярная масса >370 г/моль	$\log Kow > 4,5$ Температура плавления >65 °C Молекулярная масса >280 г/моль Молекулярная масса >370 г/моль

Профилировщик «Protein binding by OASIS» представляет собой набор структурных фрагментов, разработанных для идентификации химических веществ, способных к ковалентному связыванию с белками. Профилировщик «Organic Functional groups (nested)» позволяет осуществлять систематическую классификацию исследуемых веществ на основе наличия в их структуре функциональных групп.

Подбор близкородственных аналогов проводили последовательно. Первоначально использовали профилировщики «Skin irritation/corrosion Inclusion/Exclusion rules by BfR» и «Eye irritation/corrosion Inclusion/Exclusion rules by BfR». Если сформировать группу аналогов не удавалось, применяли «Protein binding by OASIS», затем «Organic Functional groups (nested)».

Оценку прогноза проводили путем сопоставления рассчитанного в OECD QSAR Toolbox значения с соответствующим экспериментальным показателем. Для количественных конечных точек прогноз считали правильным при отклонении расчетного значения от экспериментального не более чем на 0,5 балла. При наличии диапазона экспериментальных значений учитывали отклонение от его границ.

Как для качественного, так и для количественного прогноза рассчитывались следующие показатели:

- истинно положительный прогноз (англ. True Positive, далее - TP);
- истинно отрицательный прогноз (англ. True Negative, далее - TN);
- ложноположительный прогноз (англ. False Positive, далее - FP);
- ложноотрицательный прогноз (англ. False Negative, далее - FN);
- точность: $(TP + TN) / (TP + TN + FP + FN)$;
- чувствительность: $TP / (TP + FN)$;
- специфичность: $TN / (TN + FP)$.

Дополнительно для качественных показателей рассчитывалась:

- сбалансированная точность: $(\text{чувствительность} + \text{специфичность}) / 2$

Для статистической обработки результатов использовалась программа Microsoft Excel.

Результаты

Прогнозирование раздражающего действия на кожу

При прогнозировании раздражающего действия на кожу наиболее высокая точность получена для качественной оценки раздражающего/коррозионного действия - 73,2%. Для количественной оценки отека и эритемы кожи точность составила 60,0% и 62,0% соответственно.

Показатели прогностической способности OECD QSAR Toolbox для конечных точек, характеризующих раздражающее действие на кожу, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Рассчитанные показатели прогностической способности при оценке раздражающего действия на кожу.

Table 2. Calculated predictive ability values for skin irritation assessment.

Показатель	Точность	Чувствительность	Специфичность
------------	----------	------------------	---------------

Отек	60,0%	61,5%	54,5%
Эритема	62,0%	65,9%	33,3%
Раздражение кожи	73,2%	68,3%	89,0%

Примеры результатов прогнозирования раздражающего действия химических веществ на кожу представлены в таблице 3.

Таблица 3. Примеры результатов прогнозирования раздражающего действия химических веществ на кожу.

Таблица 3. Examples of results for predicting the irritant effects of chemicals on skin.

Наименование (CAS)	Целевой показатель	Экспериментальные данные	Результат прогноза
N-Метил-2-пирролидон (872-50-4)	Отек (в баллах)	0	0,827
	Эритема (в баллах)	0,5	1,71
	Раздражение/коррозия кожи	Класс 2 по СГС	Коррозия
3а,4,7,7а-Тetraгидро-4,7-метаноинден (77-73-6)	Отек (в баллах)	2,3	1,38
	Эритема (в баллах)	2	1,75
	Раздражение/коррозия кожи	Класс 2 по СГС	Класс 2 по СГС
5-Хлор-2-(2,4-дихлорфенокси)фенол (3380-34-5)	Отек (в баллах)	0,5-2	0,869
	Эритема (в баллах)	1,0-3	1,49
	Раздражение/коррозия кожи	Класс 2 по СГС	Класс 2 по СГС
Примечание: CAS - регистрационный номер Химической реферативной службы Note: CAS – Chemical Abstracts Service Registry Number			

Прогнозирование раздражающего действия на слизистые оболочки глаз

При прогнозировании раздражающего действия на слизистые оболочки глаз точность различалась в зависимости от рассчитываемого показателя.

Наибольшее значение получено для оценки покраснения радужной оболочки - 73,2%, наименьшее - для покраснения конъюнктивы - 46,5%. Для качественной оценки раздражающего/коррозионного действия точность составила 59,0%. Результаты оценки прогностической способности при прогнозировании раздражающего действия на слизистые оболочки глаз представлены в таблице 4.

Таблица 4. Рассчитанные показатели прогностической способности при оценке раздражающего действия на слизистые оболочки глаз.

Table 4. Examples of results for predicting the irritant effects of chemicals on skin

Показатель	Точность	Чувствительность	Специфичность
Покраснение конъюнктивы	46,5%	46,3%	50,0%
Хемоз	63,4%	67,6%	25,0%
Покраснение радужной оболочки	73,2%	65,5%	91,7%
Помутнение роговицы	63,6%	59,5%	85,7%
Раздражение глаз	59,0%	52,2%	89,0%

В таблице 5 представлены примеры результатов прогнозирования показателей раздражающего действия на слизистые оболочки глаз.

Таблица 5. Примеры результатов прогнозирования раздражающего действия химических веществ на слизистые оболочки глаз.

Table 5. Examples of results of predicting the irritating effect of chemicals on the mucous membranes of the eyes.

Наименование (CAS)	Целевой показатель	Экспериментальные данные	Результат прогноза
Этандиаль (107-22-2)	Покраснение конъюнктивы (в баллах)	1-1,6	1,35
	Хемоз	0-3,5	2,06
	Ирит (в баллах)	0	0,289
	Помутнение роговицы (в	0-2,0	1,3

Наименование (CAS)	Целевой показатель	Экспериментальные данные	Результат прогноза
	баллах)		
	Раздражение/коррозия глаз	Класс 2 по СГС	Класс 1 по СГС
3а,4,7,7а-Тетрагидро-4,7-метаноинден (77-73-6)	Покраснение конъюнктивы (в баллах)	0,22 - 0,89	1,38
	Хемоз (в баллах)	0,1	0,479
	Ирит (в баллах)	0,3-0,7	0
	Помутнение роговицы (в баллах)	0,7-1,3	0
	Раздражение/коррозия глаз	Класс 2 по СГС	Не классифицируется по СГС
2-Бутоксигэтанол (111-76-2)	Покраснение конъюнктивы (в баллах)	2-2,6	2,28
	Хемоз (в баллах)	0,83-2,83	1,21
	Ирит (в баллах)	0,5-1,33	0,519
	Помутнение роговицы (в баллах)	0,89-3	1,77
	Раздражение/коррозия глаз	Класс 2 по СГС	Класс 2 по СГС

С учётом неравного соотношения положительных и отрицательных результатов для качественных конечных точек дополнительно рассчитывали сбалансированную точность. Результаты расчёта представлены в таблице 6.

Таблица 6. Сбалансированная точность качественного прогноза раздражающего действия химических веществ

Table 6. Balanced accuracy of qualitative prediction of irritant effects of chemicals.

Показатель	Сбалансированная точность, %
Раздражающее/коррозионное действие на кожу	78,7%
Раздражающее/коррозионное действие на слизистые оболочки глаз	70,6%

Для возможности сопоставления полученных результатов с данными других авторов, выполненных с использованием других прогнозных систем, проведён анализ составов выборок химических веществ, использованных в опубликованных исследованиях *in silico*. Сопоставление по CAS-номерам не выявило идентичных химических веществ в доступных для анализа перечнях, что не позволило провести прямое сравнение расчётных результатов для одних и тех же соединений.

Обсуждение. Проведенная оценка показала, что точность прогноза существенно варьируется в зависимости от оцениваемого показателя. Различия в полученных результатах могут быть связаны как с характером оцениваемых показателей раздражающего действия, так и с особенностями формирования прогноза в OECD QSAR Toolbox. Для каждой конечной точки прогноз основывается на соответствующих экспериментальных данных по химическим веществам-аналогам. Количественные показатели отека, эритемы и изменений отдельных структур глаза представляют собой балльные характеристики выраженности реакции, поэтому вариабельность экспериментальных значений непосредственно отражается на результатах прогнозирования. Существенное значение имеет состав сформированной группы химических веществ-аналогов. При их подборе необходимо учитывать не только общие функциональные группы и степень структурного сходства, но и особенности строения и физико-химических свойств веществ, связанные с проявлением раздражающего действия.

Последовательное использование нескольких профилировщиков, в том числе неспецифических, позволяло учитывать различные признаки структурного сходства и формировать группы аналогов в случаях, когда профилировщики раздражающего и коррозионного действия не обеспечивали необходимого количества веществ с экспериментальными данными.

Для качественной оценки раздражающего действия на кожу и слизистые оболочки глаз специфичность превышала чувствительность, что свидетельствует о более высокой способности правильно определять отсутствие раздражающего

действия. Сходная особенность была установлена G.R. Verheyen и соавт. при оценке с использованием Derek Nexus и моделей Case Ultra: для кожи специфичность составляла 89-96% при значительно более низкой чувствительности, а при прогнозировании воздействия на глаза специфичность также превышала чувствительность для большинства рассматриваемых моделей [11]. Аналогичная тенденция наблюдалась и в исследовании L. Geerts и соавт., где для ряда моделей высокая способность правильно определять отсутствие раздражающего действия сочеталась с большим количеством ложноотрицательных прогнозов [12]. Полученные данные позволяют предположить, что для ряда существующих *in silico*-программ определение отсутствия раздражающего действия является менее сложной задачей, чем достоверное выявление веществ, вызывающих раздражение.

В исследовании G.R. Verheyen и соавт. при использовании программ Derek Nexus и Case Ultra точность прогнозирования раздражающего и коррозионного действия на кожу составляла 51-59%, чувствительность - 14-32%, специфичность - 89-96 %; для воздействия на глаза соответствующие значения составляли 45-59%, 11-45% и 78-96 % [11]. Так, в настоящем исследовании при оценке воздействия на кожу получены более высокие значения точности и чувствительности, а при оценке воздействия на глаза показатели находились на уровне верхних значений, установленных G.R. Verheyen и соавт.

Схожие результаты для существующих программных систем получены L. Geerts и соавт.: при использовании Toxtree и моделей Case Ultra точность прогнозирования раздражающего действия на глаза составила 50 % [12]. При этом в указанных исследованиях выборка веществ с подтвержденным эффектом «положительный» включала как раздражающие, так и коррозионные вещества.

При оценке раздражающего действия на слизистые оболочки глаз особое значение имеет обратимый характер эффектов веществ 2 класса опасности, являющийся одним из определяющих критериев их классификации по СГС. В исследовании Y. Kang и соавт. точность прогнозирования раздражающего действия для веществ 2 класса составила 50%, тогда как для соединений 1 класса опасности и веществ, не подлежащих классификации, - 80% и 76,9% соответственно [14]. A.C. Silva и соавт. также получили наиболее низкие показатели при прогнозировании категорий 2A и 2B. По данным авторов, результаты повторных экспериментальных исследований для веществ этих подклассов характеризуются значительной вариабельностью, что необходимо учитывать при их классификации [15].

Ретроспективный анализ результатов теста Дрейза при оценке раздражающего действия на глаза показал, что вследствие внутритестовой вариабельности около 12% веществ, отнесенных ко 2 классу опасности по СГС, при повторной оценке могли быть отнесены к веществам, не вызывающим раздражения глаз [24]. Это свидетельствует о наличии неопределенности уже на уровне экспериментальных данных, используемых в качестве основы для оценки прогностической способности расчетных методов.

А.С. Silva и соавт. при использовании бинарных QSAR-моделей получили значения сбалансированной точности от 72% до 88% [15]. Для наиболее эффективной модели MuDRA данный показатель составил 88% при чувствительности 89% и специфичности 86%. Более высокие показатели представлены также Q. Wang и соавт. и P. Di и соавт., использовавшими для построения моделей несколько тысяч химических веществ и различные алгоритмы машинного обучения [13, 16]. Для отдельных разработанных ими моделей точность превышала 90%. В отличие от указанных моделей, в настоящем исследовании прогноз в OECD QSAR Toolbox формировали на основании экспериментальных данных структурно близких аналогов, отобранных для конкретного вещества.

Для итоговой оценки качественного прогноза использовали сбалансированную точность, при расчете которой чувствительность и специфичность имеют равный вес. Для сравнительной интерпретации полученных значений использовали ориентировочный уровень 70,0%, применяемый при оценке прогностической способности классификационных QSAR-моделей [25-27]. Полученные значения сбалансированной точности - 78,7% для кожи и 70,6% для глаз - достигали или превышали указанный уровень.

Ограничения исследования. OECD QSAR Toolbox не позволяет проводить расчеты для неорганических соединений и полимеров, а для металлоорганических соединений возможность выполнения прогноза зависит от особенностей их структуры.

Заключение. Проведенное исследование показало возможность применения OECD QSAR Toolbox для предварительной скрининговой оценки раздражающего действия химических веществ на кожу и слизистые оболочки глаз. Наиболее высокие показатели прогностической способности получены при качественной оценке наличия или отсутствия эффекта: сбалансированная точность составила 78,7% и 70,6% соответственно и достигала используемого в литературе ориентировочного уровня 70%. Полученные данные обосновывают

перспективность применения OECD QSAR Toolbox для предварительной оценки раздражающего действия химических веществ.

Вклад авторов

Концепция и дизайн исследования – Хамидулина Х.Х., Тарасова Е.В., Горбунова Д.И.

Сбор и обработка материала – Горбунова Д.И., Замкова И.В.

Анализ данных – Горбунова Д.И.

Написание текста и оформление статьи – Горбунова Д.И.

Редактирование – Горбунова Д.И.

Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех ее частей.

Author contribution:

Concept and design of the study – Khamidulina Kh. Kh., Tarasova E.V.

Collection and processing of material – Gorbunova D.I., Zamkova I.V.

Data analysis – Gorbunova D.I.

Writing the text and designing the article – Gorbunova D.I.

Editing – Gorbunova D.I.

All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Список литературы:

1. United Nations. Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS). 11th rev. ed. New York; Geneva: United Nations; 2025.
2. OECD. (Q)SAR Assessment Framework: Guidance for the Regulatory Assessment of (Quantitative) Structure Activity Relationship Models and Predictions. 2nd ed. OECD Series on Testing and Assessment, No. 405. Paris: OECD Publishing; 2024. doi:10.1787/bbdac345-en.
3. OECD. Guidance on Grouping of Chemicals. 3rd ed. OECD Series on Testing and Assessment, No. 418. Paris: OECD Publishing; 2025. doi:10.1787/b254a158-en.

4. European Chemicals Agency. Read-Across Assessment Framework (RAAF). Helsinki: ECHA; 2017. doi:10.2823/619212.
5. OECD. Guidance Document on an Integrated Approach on Testing and Assessment (IATA) for Skin Corrosion and Irritation. OECD Series on Testing and Assessment, No. 203. Paris: OECD Publishing; 2017. doi:10.1787/9789264274693-en.
6. OECD. Guidance Document on Integrated Approaches to Testing and Assessment (IATA) for Serious Eye Damage and Eye Irritation. 3rd ed. Paris: OECD Publishing; 2024. doi:10.1787/cdb440be-en.
7. OECD QSAR Toolbox. [<https://www.oecd.org/en/data/tools/oecd-qsar-toolbox.html>]. Дата обращения: 19.08.2026.
8. Хамидулина Х.Х., Тарасова Е.В., Ластовецкий М.Л. Прогностические системы в профилактической токсикологии (обзор литературы) // Токсикологический вестник. - 2025. - Т. 33. - №2. - С. 134-143. doi: 10.47470/0869-7922-2025-33-2-134-143
9. Khamidulina Khalidya Khizbulaevna., *et al.* «Use of Predictive Systems in the Hazards Assessment of New Chemicals Under Notification Procedure». EC Pharmacology and Toxicology 14.4 (2026): 01-12.
10. Gallegos Saliner A, Tier G, Worth AP. A review of (Q)SAR models for skin and eye irritation and corrosion. QSAR Comb Sci. 2008;27(1):49-59. doi:10.1002/qsar.200710103.
11. Verheyen GR, Braeken E, Van Deun K, Van Miert S. Evaluation of existing (Q)SAR models for skin and eye irritation and corrosion to use for REACH registration. Toxicol Lett. 2017;265:47-52. doi:10.1016/j.toxlet.2016.11.007.
12. Geerts L, Adriaens E, Alépée N, Guest R, Willoughby JA Sr, Kandarova H, *et al.* CON4EI: Evaluation of QSAR models for hazard identification and labelling of eye irritating chemicals. Toxicol In Vitro. 2018;49:90-98. doi:10.1016/j.tiv.2017.09.004.
13. Wang Q, Li X, Yang H, Cai Y, Wang Y, Wang Z, *et al.* In silico prediction of serious eye irritation or corrosion potential of chemicals. RSC Adv. 2017;7(11):6697-6703. doi:10.1039/C6RA25267B.
14. Kang Y, Jeong B, Lim DH, Lee D, Lim KM. In silico prediction of the full United Nations Globally Harmonized System eye irritation categories of liquid chemicals by IATA-like bottom-up approach of random forest method. J Toxicol Environ Health A. 2021;84(23):960-972. doi:10.1080/15287394.2021.1956661.
15. Silva AC, Borba JVB, Alves VM, Hall SUS, Furnham N, Kleinstreuer N, *et al.* Novel computational models offer alternatives to animal testing for assessing eye irritation and corrosion potential of chemicals. Artif Intell Life Sci. 2021;1:100028. doi:10.1016/j.ailsci.2021.100028.
16. Di P, Zheng M, Yang T, Chen G, Ren J, Li X, Jiang H. Prediction of serious eye damage or eye irritation potential of compounds via consensus labelling models and

- active learning models based on uncertainty strategies. *Food Chem Toxicol.* 2022;169:113420. doi:10.1016/j.fct.2022.113420.
17. Kang Y, Kim MG, Lim KM. Machine-learning based prediction models for assessing skin irritation and corrosion potential of liquid chemicals using physicochemical properties by XGBoost. *Toxicol Res.* 2023;39(2):295-305. doi:10.1007/s43188-022-00168-8.
18. OECD. Test No. 404: Acute Dermal Irritation/Corrosion. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 4. Paris: OECD Publishing; 2015. doi:10.1787/9789264242678-en.
19. OECD. Test No. 405: Acute Eye Irritation/Corrosion. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 4. Paris: OECD Publishing; 2023. doi:10.1787/9789264185333-en.
20. Hulzebos E, Walker JD, Gerner I, Schlegel K. Use of structural alerts to develop rules for identifying chemical substances with skin irritation or skin corrosion potential. *QSAR Comb Sci.* 2005;24(3):332-342. doi:10.1002/qsar.200430905.
21. Gerner I, Schlegel K, Walker JD, Hulzebos E. Use of physicochemical property limits to develop rules for identifying chemical substances with no skin irritation or corrosion potential. *QSAR Comb Sci.* 2004;23(9):726-733. doi:10.1002/qsar.200430880.
22. Tsakovska I, Gallegos Saliner A, Netzeva T, Pavan M, Worth AP. Evaluation of SARs for the prediction of eye irritation/corrosion potential: structural inclusion rules in the BfR decision support system. *SAR QSAR Environ Res.* 2007;18(3-4):221-235. doi:10.1080/10629360701304063.
23. Guo Y, Zhao L, Zhang X, Zhu H. Using a hybrid read-across method to evaluate chemical toxicity based on chemical structure and biological data. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2019;178:178-187. doi:10.1016/j.ecoenv.2019.04.019.
24. Adriaens E, Barroso J, Eskes C, Hoffmann S, McNamee P, Alépée N, et al. Retrospective analysis of the Draize test for serious eye damage/eye irritation: importance of understanding the in vivo endpoints under UN GHS/EU CLP for the development and evaluation of in vitro test methods. *Arch Toxicol.* 2014;88(3):701-723. doi:10.1007/s00204-013-1156-8.
25. Golbraikh A, Muratov E, Fourches D, Tropsha A. Data set modelability by QSAR. *J Chem Inf Model.* 2014;54(1):1-4. doi:10.1021/ci400572x.
26. Solimeo R, Zhang J, Kim M, Sedykh A, Zhu H. Predicting chemical ocular toxicity using a combinatorial QSAR approach. *Chem Res Toxicol.* 2012;25(12):2763-2769. doi:10.1021/tx300393v.
27. Daood NJ, Russo DP, Chung E, Qin X, Zhu H. Predicting chemical immunotoxicity through data-driven QSAR modeling of aryl hydrocarbon receptor agonism and related

toxicity mechanisms. Environ Health. 2024;2(7):474-485. doi:10.1021/envhealth.4c00026.

References:

1. United Nations. Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS). 11th rev. ed. New York; Geneva: United Nations; 2025.
2. OECD. (Q)SAR Assessment Framework: Guidance for the Regulatory Assessment of (Quantitative) Structure Activity Relationship Models and Predictions. 2nd ed. OECD Series on Testing and Assessment, No. 405. Paris: OECD Publishing; 2024. doi:10.1787/bbdac345-en.
3. OECD. Guidance on Grouping of Chemicals. 3rd ed. OECD Series on Testing and Assessment, No. 418. Paris: OECD Publishing; 2025. doi:10.1787/b254a158-en.
4. European Chemicals Agency. Read-Across Assessment Framework (RAAF). Helsinki: ECHA; 2017. doi:10.2823/619212.
5. OECD. Guidance Document on an Integrated Approach on Testing and Assessment (IATA) for Skin Corrosion and Irritation. OECD Series on Testing and Assessment, No. 203. Paris: OECD Publishing; 2017. doi:10.1787/9789264274693-en.
6. OECD. Guidance Document on Integrated Approaches to Testing and Assessment (IATA) for Serious Eye Damage and Eye Irritation. 3rd ed. Paris: OECD Publishing; 2024. doi:10.1787/cdb440be-en.
7. OECD QSAR Toolbox. [<https://www.oecd.org/en/data/tools/oecd-qsar-toolbox.html>]. Date of access: 19.08.2026.
8. Khamidulina K.K., Tarasova E.V., Lastovetskiy M.L. Prognostic systems in preventive toxicology (literature review) // Toxicological Review. - 2025. - Vol. 33. - N. 2. - P. 134-143. doi: 10.47470/0869-7922-2025-33-2-134-143
9. Khamidulina Khalidya Khizbulaevna., et al. «Use of Predictive Systems in the Hazards Assessment of New Chemicals Under Notification Procedure». EC Pharmacology and Toxicology 14.4 (2026): 01-12.
10. Gallegos Saliner A, Tier G, Worth AP. A review of (Q)SAR models for skin and eye irritation and corrosion. QSAR Comb Sci. 2008;27(1):49-59. doi:10.1002/qsar.200710103.
11. Verheyen GR, Braeken E, Van Deun K, Van Miert S. Evaluation of existing (Q)SAR models for skin and eye irritation and corrosion to use for REACH registration. Toxicol Lett. 2017;265:47-52. doi:10.1016/j.toxlet.2016.11.007.
12. Geerts L, Adriaens E, Alépée N, Guest R, Willoughby JA Sr, Kandarova H, et al. CON4EI: Evaluation of QSAR models for hazard identification and labelling of eye irritating chemicals. Toxicol In Vitro. 2018;49:90-98. doi:10.1016/j.tiv.2017.09.004.

13. Wang Q, Li X, Yang H, Cai Y, Wang Y, Wang Z, et al. In silico prediction of serious eye irritation or corrosion potential of chemicals. *RSC Adv.* 2017;7(11):6697-6703. doi:10.1039/C6RA25267B.
14. Kang Y, Jeong B, Lim DH, Lee D, Lim KM. In silico prediction of the full United Nations Globally Harmonized System eye irritation categories of liquid chemicals by IATA-like bottom-up approach of random forest method. *J Toxicol Environ Health A.* 2021;84(23):960-972. doi:10.1080/15287394.2021.1956661.
15. Silva AC, Borba JVB, Alves VM, Hall SUS, Furnham N, Kleinstreuer N, et al. Novel computational models offer alternatives to animal testing for assessing eye irritation and corrosion potential of chemicals. *Artif Intell Life Sci.* 2021;1:100028. doi:10.1016/j.ailsci.2021.100028.
16. Di P, Zheng M, Yang T, Chen G, Ren J, Li X, Jiang H. Prediction of serious eye damage or eye irritation potential of compounds via consensus labelling models and active learning models based on uncertainty strategies. *Food Chem Toxicol.* 2022;169:113420. doi:10.1016/j.fct.2022.113420.
17. Kang Y, Kim MG, Lim KM. Machine-learning based prediction models for assessing skin irritation and corrosion potential of liquid chemicals using physicochemical properties by XGBoost. *Toxicol Res.* 2023;39(2):295-305. doi:10.1007/s43188-022-00168-8.
18. OECD. Test No. 404: Acute Dermal Irritation/Corrosion. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 4. Paris: OECD Publishing; 2015. doi:10.1787/9789264242678-en.
19. OECD. Test No. 405: Acute Eye Irritation/Corrosion. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 4. Paris: OECD Publishing; 2023. doi:10.1787/9789264185333-en.
20. Hulzebos E, Walker JD, Gerner I, Schlegel K. Use of structural alerts to develop rules for identifying chemical substances with skin irritation or skin corrosion potential. *QSAR Comb Sci.* 2005;24(3):332-342. doi:10.1002/qsar.200430905.
21. Gerner I, Schlegel K, Walker JD, Hulzebos E. Use of physicochemical property limits to develop rules for identifying chemical substances with no skin irritation or corrosion potential. *QSAR Comb Sci.* 2004;23(9):726-733. doi:10.1002/qsar.200430880.
22. Tsakovska I, Gallegos Saliner A, Netzeva T, Pavan M, Worth AP. Evaluation of SARs for the prediction of eye irritation/corrosion potential: structural inclusion rules in the BfR decision support system. *SAR QSAR Environ Res.* 2007;18(3-4):221-235. doi:10.1080/10629360701304063.
23. Guo Y, Zhao L, Zhang X, Zhu H. Using a hybrid read-across method to evaluate chemical toxicity based on chemical structure and biological data. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2019;178:178-187. doi:10.1016/j.ecoenv.2019.04.019.

24. Adriaens E, Barroso J, Eskes C, Hoffmann S, McNamee P, Alépée N, et al. Retrospective analysis of the Draize test for serious eye damage/eye irritation: importance of understanding the in vivo endpoints under UN GHS/EU CLP for the development and evaluation of in vitro test methods. *Arch Toxicol.* 2014;88(3):701-723. doi:10.1007/s00204-013-1156-8.
25. Golbraikh A, Muratov E, Fourches D, Tropsha A. Data set modelability by QSAR. *J Chem Inf Model.* 2014;54(1):1-4. doi:10.1021/ci400572x.
26. Solimeo R, Zhang J, Kim M, Sedykh A, Zhu H. Predicting chemical ocular toxicity using a combinatorial QSAR approach. *Chem Res Toxicol.* 2012;25(12):2763-2769. doi:10.1021/tx300393v.
27. Daoood NJ, Russo DP, Chung E, Qin X, Zhu H. Predicting chemical immunotoxicity through data-driven QSAR modeling of aryl hydrocarbon receptor agonism and related toxicity mechanisms. *Environ Health.* 2024;2(7):474-485. doi:10.1021/envhealth.4c00026.

Информация об авторах

Хамидулина Халидя Хизбулаевна – доктор медицинских наук, главный научный сотрудник, руководитель НИАЦ «Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ» ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора; профессор, заведующая кафедрой гигиены ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России; тел.: +7(499)145-60-23, e-mail: khalidiya@yandex.ru

Тарасова Елена Владимировна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, заместитель руководителя НИАЦ «Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ» ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора; e-mail: tarasova.ev@fncg.ru

Горбунова Дарья Ивановна – врач по общей гигиене НИАЦ «Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ» ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора; <https://orcid.org/0009-0003-2141-4456>, e-mail: gorbunova.di@fncg.ru

Замкова Ирина Валентиновна – врач по санитарно-гигиеническим лабораторным исследованиям, младший научный сотрудник НИАЦ «Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ» ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора; e-mail: zamkova.iv@fncg.ru

Author information

Khamidulina Khalidya Khizbulaevna - Doctor of Medical Sciences, Chief Researcher, Director of the Scientific Information and Analytical Center "Russian Register of Potentially Hazardous Chemical and Biological Substances" of the F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Rospotrebnadzor; Professor, Head of the Department of Hygiene at the Russian Medical Academy of Continuous Professional Education of the Ministry of Health of the Russian Federation, tel.: +7(499)145-60-23, e-mail: khalidiya@yandex.ru.

Tarasova Elena Vladimirovna - Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, Deputy Head of the Scientific Information and Analytical Center "Russian Register of Potentially Hazardous Chemical and Biological Substances" of the F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Rospotrebnadzor, e-mail: tarasova.ev@fncg.ru.

Gorbunova Daria Ivanovna - General Hygiene Doctor at the Scientific Information and Analytical Center "Russian Register of Potentially Hazardous Chemical and Biological Substances" of the F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Rospotrebnadzor, <https://orcid.org/0009-0003-2141-4456>, e-mail: gorbunova.di@fncg.ru.

Zamkova Irina Valentinovna - Doctor of sanitary and hygienic laboratory research, Junior Researcher at the Scientific Information and Analytical Center "Russian Register of Potentially Hazardous Chemical and Biological Substances" of the F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Rospotrebnadzor, e-mail: zamkova.iv@fncg.ru.

Поступила/Received: 24.08.2026

Принята в печать/Accepted: 27.08.2026

УДК 615.9 616.36-092.9 577.121

КЛЕТОЧНАЯ ЛИНИЯ IAR-2 HyPer ДЛЯ ОЦЕНКИ РАННЕГО ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ОТВЕТА НА ТОКСИКАНТЫ

Каримов Д.О.^{1,2}, Якупова Т.Г.¹, Рябова Ю.В.¹, Репина Э.Ф.¹, Кудояров Э.Р.¹,
Каримов Д.Д.¹, Гарипова З.Р.³

¹ ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», Уфа, Россия

² ФГБНУ «Национальный НИИ общественного здоровья имени Н.А. Семашко»,
Москва, Россия

³ ФГКОУ ВО УЮИ МВД России, Уфа, Россия

Ранние изменения окислительно-восстановительного состояния клеток печени часто предшествуют выраженному цитотоксическому эффекту. Для их анализа необходимы модели, позволяющие регистрировать изменение внутриклеточной перекиси водорода в режиме реального времени.

Цель исследования - оценить возможности стабильной клеточной модели IAR-2 HyPer, полученной в рамках работы путем введения в клетки IAR-2 плазмиды рHyPer-cyto, для регистрации раннего H₂O₂-зависимого ответа при воздействии тетрахлорметана, парацетамола и этанола, а также при добавлении оксиметилурацила.

Материалы и методы. Использовали стабильную клеточную модель IAR-2 HyPer, полученную на основе исходной эпителиальной линии печени крысы IAR-2 и коммерческой плазмиды рHyPer-cyto производства Evrogen, кодирующей цитозольный сенсор HyPer. Клетки культивировали в среде DMEM/F-12 с 10 % фетальной бычьей сывороткой при 37 °С и 5 % CO₂. Стабильные клоны отбирали после трансфекции и селекции G-418 по равномерности цитозольной флуоресценции и фотостабильности сигнала. Динамику HyPer-сигнала регистрировали при ратиометрическом возбуждении 405 и 488 нм после внесения токсикантов и оксиметилурацила.

Результаты. Тетрахлорметан в концентрациях 50 и 100 мМ вызывал раннее увеличение HyPer-сигнала, тогда как при 200 мМ дополнительного роста не наблюдали. На фоне оксиметилурацила сигнал в сериях с тетрахлорметаном возрастал, что может отражать сохранение функционально активной части клеточной популяции и изменение радикального потока. Парацетамол 30 и 60 мМ приводил к отрицательному изменению нормированного сигнала относительно исходного уровня. Этот результат рассматривали как проявление рН-зависимых и

цитотоксических ограничений сенсора, а не как снижение образования H_2O_2 . Этанол 2,5-10 % формировал дозозависимый положительный HyPer-ответ, а действие оксиметилурацила в этой модели имело двухфазный характер.

Заключение. IAR-2 HyPer пригодна для сравнительной регистрации раннего ответа клеток печени на токсиканты различной природы. Интерпретация данных требует учета рН-чувствительности HyPer, состояния монослоя и независимой оценки жизнеспособности. Оксиметилурацил может рассматриваться как потенциальный модификатор раннего окислительно-восстановительного ответа, однако выводы о гепатопротекторном действии должны подтверждаться дополнительными биохимическими и цитологическими показателями.

Ключевые слова. IAR-2 HyPer, перекись водорода, активные формы кислорода, токсическое поражение печени, тетрахлорметан, парацетамол, этанол, оксиметилурацил

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа проведена за счет средств субсидии на выполнение государственного задания в рамках отраслевой научно-исследовательской программы Роспотребнадзора «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России» на 2021-2025 гг. Пункт 6.1.8. Номер государственной регистрации 121062100058-8.

Для цитирования: Каримов Д.О., Якупова Т.Г., Рябова Ю.В., Репина Э.Ф., Кудояров Э.Р., Каримов Д.Д., Гарипова З.Р. Клеточная линия IAR-2 HyPer для оценки раннего окислительно-восстановительного ответа на токсиканты. Медицина труда и экология человека. 2026; 3:270-286.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10314>

Для корреспонденции: Татьяна Георгиевна Якупова, e-mail tanya.kutlina.92@mail.ru,

IAR-2 HyPer CELL LINE FOR ASSESSMENT OF EARLY REDOX RESPONSES TO TOXICANTS

Karimov D.O.^{1,2}, Yakupova T.G.¹, Ryabova Yu.V.¹, Repina E.F.¹, Kudoyarov E.R.¹,
Karimov D.D.¹, Garipova Z.R.³

¹ Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, Russia

² N.A. Semashko National Research Institute of Public Health, Moscow, Russia

³ Ufa Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Ufa, Russia

Early changes in the redox state of liver cells often precede overt cytotoxic injury. Experimental models that allow real-time monitoring of intracellular hydrogen peroxide are therefore needed for toxicological studies.

Objective. To assess the applicability of the stable IAR-2 HyPer cell model generated in this work by introducing the Evrogen pHyPer-cyto plasmid into IAR-2 cells for recording early H₂O₂-dependent responses to carbon tetrachloride, acetaminophen and ethanol, including experiments with oxymethyluracil.

Materials and methods. The stable IAR-2 HyPer cell model generated from the parental rat liver epithelial IAR-2 line using pHyPer-cyto plasmid encoding the cytosolic HyPer sensor was used. Cells were cultured in DMEM/F-12 supplemented with 10 % fetal bovine serum at 37 °C and 5 % CO₂. Stable clones were selected after transfection and G-418 selection according to uniform cytosolic fluorescence and signal photostability. HyPer signal dynamics were recorded under ratiometric excitation at 405 and 488 nm after exposure to toxicants and oxymethyluracil.

Results. Carbon tetrachloride at 50 and 100 mM induced an early increase in the HyPer signal, whereas 200 mM did not further increase the response. In the presence of oxymethyluracil, the signal increased in carbon tetrachloride experiments, which may reflect preservation of a functionally active cell fraction and changes in radical flux. Acetaminophen at 30 and 60 mM caused a negative change in the normalized signal relative to baseline. This finding was interpreted as a manifestation of pH-dependent and cytotoxic limitations of the sensor rather than as decreased H₂O₂ generation. Ethanol at 2.5-10 % produced a dose-dependent positive HyPer response, while the effect of oxymethyluracil in this model was biphasic.

Conclusion. The IAR-2 HyPer line is suitable for comparative recording of early liver cell responses to toxicants of different nature. Data interpretation requires consideration of HyPer pH sensitivity, monolayer condition and independent viability assessment. Oxymethyluracil may be considered a potential modifier of early redox responses, but

conclusions regarding hepatoprotection should be confirmed by additional biochemical and cytological markers.

Keywords. IAR-2 HyPer, hydrogen peroxide, reactive oxygen species, toxic liver injury, carbon tetrachloride, acetaminophen, ethanol, oxymethyluracil

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

Funding. This study was supported by a subsidy for the state assignment within the sectoral research program of Rospotrebnadzor «Scientific substantiation of the national system for ensuring sanitary and epidemiological well-being, health risk management and improving quality of life in Russia» for 2021-2025. Item 6.1.8. State registration number 121062100058-8.

For citation: Karimov D.O., Yakupova T.G., Ryabova Yu.V., Repina E.F., Kudoyarov E.R., Karimov D.D., Garipova Z.R. IAR-2 HyPer cell line for assessment of early redox responses to toxicants. *Occupational Health and Human Ecology*. 2026; 3:270-286.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10314>

For correspondence: Tatiana G. Yakupova, e-mail: tanya.kutlina.92@mail.ru

Активные формы кислорода участвуют в нормальной внутриклеточной сигнализации, однако при избыточном образовании становятся одним из ключевых факторов токсического поражения печени. Среди них особое место занимает перекись водорода, поскольку она сравнительно стабильна, проходит через мембраны и способна передавать окислительно-восстановительный сигнал между клеточными компартментами. Для печени, выполняющей основную часть биотрансформации ксенобиотиков, ранний баланс между образованием H_2O_2 и работой антиоксидантных систем во многом определяет последующее развитие клеточного повреждения.

Тетрахлорметан, парацетамол и этанол вызывают повреждение печени через разные первичные механизмы. Тетрахлорметан метаболизируется с образованием радикальных интермедиатов, запускающих перекисное окисление липидов. Парацетамол при передозировке образует реактивный метаболит N-ацетил-p-бензохинонимин, что сопровождается истощением глутатиона, нарушением функции митохондрий и ранними изменениями внутриклеточного pH. Этанол увеличивает нагрузку на микросомальную этанол-окисляющую систему и CYP2E1, что связано с усилением образования активных форм кислорода.

Сывороточные трансаминазы, продукты перекисного окисления липидов и морфологические признаки повреждения дают преимущественно отсроченную и суммарную оценку токсического эффекта. Они плохо отражают ранние изменения внутриклеточного H_2O_2 , особенно в первые минуты после контакта с токсикантом. Флуоресцентные красители на основе дихлорофлуоресцеина также имеют ограничения, включая недостаточную специфичность к H_2O_2 , фотогенерацию активных форм кислорода и трудности точной внутриклеточной локализации.

Генетически кодируемые сенсоры HyPer позволяют регистрировать изменения H_2O_2 в живых клетках с временным разрешением, достаточным для анализа раннего токсического ответа. HyPer представляет собой химерный белок на основе флуоресцентного домена YFP и регуляторного домена OxyR из *Escherichia coli*. При окислении чувствительных цистеиновых остатков изменяются спектральные свойства сенсора, что делает возможной ратиометрическую регистрацию сигнала. Важным ограничением исходных вариантов HyPer является чувствительность YFP-домена к pH, поэтому снижение ратиометрического сигнала при ацидозе не может автоматически трактоваться как уменьшение содержания H_2O_2 .

Целью исследования была оценка стабильной клеточной модели IAR-2 HyPer, полученной в рамках работы путем введения в клетки IAR-2 плазмиды pHyPer-cyto производства Evrogen, как инструмента для регистрации раннего H_2O_2 -зависимого ответа клеток печени при воздействии тетрахлорметана, парацетамола и этанола, а также при добавлении оксиметилурацила как потенциального модификатора окислительно-восстановительного ответа.

Материалы и методы. В работе использовали стабильную клеточную модель IAR-2 HyPer, полученную авторами на основе исходной эпителиальной линии печени крысы IAR-2. Для введения цитозольного генетически кодируемого сенсора HyPer применяли коммерческую плазмиду pHyPer-cyto (Evrogen, Россия). Полученная линия сохраняла морфологию однослойного кубического эпителия и активность ключевых изоформ CYP450, что позволяет применять ее как модель клеток печени для сравнительной оценки действия ксенобиотиков.

Клетки культивировали в среде DMEM/F-12 (1 к 1) (ПанЭко, Россия), дополненной 10 % фетальной бычьей сывороткой (Biosera, Франция), 2 mM L-глутамином, пенициллином $100 \text{ Ед} \cdot \text{мл}^{-1}$ и стрептомицином $100 \text{ мкг} \cdot \text{мл}^{-1}$. Инкубацию проводили при 37°C , 5 % CO_2 и относительной влажности не менее 95 % в инкубаторе Tri-gas (HealForce, КНР). Каждые 72 ч при достижении 80 % конфлюэнтности клетки

отделяли 0,25 % трипсином-EDTA, пересевали в соотношении 1 к 5 и оценивали жизнеспособность автоматическим счетчиком LUNA II (Logos Biosystems, Республика Корея). В экспериментах использовали пассажи 10-15.

Для получения стабильной линии IAR-2 HyPer использовали плазмиду pHyPer-cyto (5,4 т.п.н., Evrogen, Россия), содержащую кассету CMV-HyPer-SV40 pA и ген устойчивости к гентицину нео^R. Данная плазмида являлась готовой генетической конструкцией для экспрессии цитозольного сенсора HyPer, тогда как получение стабильной линии IAR-2 HyPer на ее основе, отбор клонов и последующая адаптация модели к токсикологическому протоколу были выполнены в рамках настоящей работы. Плазмидная карта pHyPer-cyto с кассетой цитозольной экспрессии HyPer и основными регуляторными элементами представлена на рисунке 1.

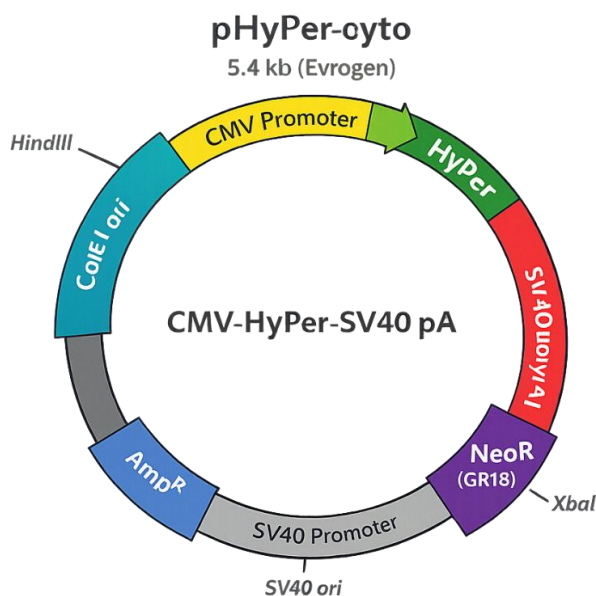


Рисунок 1. Плазмидная карта pHyPer-cyto с кассетой цитозольной экспрессии HyPer и основными регуляторными элементами

Figure 1. Plasmid map of pHyPer-cyto with the cytosolic HyPer expression cassette and main regulatory elements

На 60 % монослой (2×10^5 клеток, флакон T-25) наносили липосомальный комплекс на основе Lipofectamine 3000. Использовали 4 мкг плазмидной ДНК и 6 мкл реагента P3000, разведенные в 250 мкл DMEM. Соотношение P3000 и ДНК составляло 1,5 мкл/мкг и было выбрано как вариант, оптимизированный для IAR-

2. Комплексообразование проводили 20 мин при 25 °С. Через 5 ч трансфекционную смесь заменяли свежей средой, через 48 ч добавляли G-418 в концентрации 600 мкг·мл⁻¹. После формирования колоний концентрацию G-418 снижали до 300 мкг·мл⁻¹. Клоны с равномерным цитозольным свечением, без агрегации и с падением амплитуды менее 15 % за 5 мин непрерывного облучения отбирали под микроскопом Selenia X (20×/0,55 NA).

Для экспериментов клетки высевали в 96-луночные планшеты с прозрачным дном по $3,0 \times 10^4$ клеток на лунку в 100 мкл среды DMEM/F-12. Крайние лунки заполняли фосфатно-солевым буфером для уменьшения испарения и краевого эффекта. Через 48-72 ч инкубации, при конфлюэнтности 60-80 %, планшеты переносили на стол микроскопа Selenia X с объективом 20×/0,55 NA. Температуру поддерживали на уровне 37 °С, газообмен обеспечивали крышкой с газообменной мембраной.

До внесения токсикантов регистрировали базовую флуоресценцию в течение 10 мин при возбуждении 405 ± 10 нм и 488 ± 10 нм с регистрацией эмиссии 520-550 нм. Сигнал фиксировали каждые 30 с из центральной зоны монослоя. Одновременно регистрировали фоновую область без клеток для последующего вычитания.

Воздействия выполняли методом добавления половинного объема. В каждую лунку вносили 100 мкл 2× раствора токсиканта и оксиметилурацила (ОМУ), приготовленного на свежей среде, с получением заданных конечных концентраций. Для этанола использовали прямое разведение в среде. Для парацетамола (ПРЦ, АРАР) использовали водный или средовой раствор. Для тетрахлорметана (ТХМ, CCl₄) применяли раствор в диметилсульфоксиде, при этом конечное содержание носителя не превышало 0,1 % об./об. Для H₂O₂ и дитиотреитола (ДТТ) использовали стерильно фильтрованные водные растворы.

Планшет включал отрицательные контроли с соответствующим носителем, положительный контроль H₂O₂ 1 мМ, редуционный контроль ДТТ 0,025× для нижней калибровочной точки НуРег и группу ОМУ без токсикантов. Каждая серия учитывала фактор наличия ОМУ 210 мкМ. На группу приходилось 6 независимых лунок. Раскладку условий рандомизировали блочно, чтобы исключить систематическое смещение по строкам и столбцам планшета.

После внесения растворов кинетику НуРег регистрировали в течение 60 мин с тем же шагом съемки. Затем планшеты возвращали в инкубатор до 24-часовой точки для оценки жизнеспособности по ресазурину. Ресазурин применяли в конечной концентрации 10 мкМ, инкубация составляла 30 мин, чтение проводили при 560 и

590 нм с учетом бланка среды и нормировкой на среднее значение отрицательного контроля.

Для этанола использовали концентрации 2,5 %, 5 % и 10 %. Для парацетамола использовали 30 и 60 мМ. Для тетрахлорметана использовали 50, 100 и 200 мМ. Эти концентрации рассматривали как кратковременную провокационную нагрузку для анализа предельных режимов HuPer -ответа, а не как прямой эквивалент уровней экспозиции *in vivo*. Основную интерпретацию связывали с ранней кинетикой сигнала и последующей оценкой жизнеспособности.

Обработку изображений выполняли по схеме ратиометрической микроскопии. Из каждого канала вычитали средний сигнал фоновой области, затем рассчитывали отношение $R = F_{488}/F_{405}$ для каждого кадра. Сигнал нормировали на среднее значение базового окна R_0 , рассчитанного по последним 3 мин до воздействия. Отклик выражали как $\Delta R/R_0 \times 100 \%$ и дополнительно оценивали относительно разброса базовой линии.

Для количественного сравнения вычисляли пиковую амплитуду $(\Delta R/R_0)_{\text{max}}$, время достижения пика, площадь под кривой AUC_{0-30} минут по трапецеидальному правилу и максимальную скорость нарастания на участке 0-15 минут. Размерность AUC указывали как произведение единиц сигнала и времени. Для рядов в условных единицах использовали усл.ед.×мин, для нормированных рядов использовали %×мин. Качество серии оценивали по Z' -фактору с H_2O_2 как положительным контролем и ДТТ как отрицательным контролем. Приемлемым считали $Z' \geq 0,5$, серии с $Z' < 0,3$ повторяли.

Визуальный контроль морфологии и плотности монослоя проводили до и после экспозиции. Лунки с отслоением более 10 % площади, агрегатами, дефектами покрытия или выраженной неравномерностью освещенности исключали до начала анализа. Все временные ряды проходили коррекцию фона, проверку фотодеградаци по базовой фазе и нормировку R/R_0 .

Статистическую обработку выполняли в среде Python с использованием NumPy, pandas, SciPy, statsmodels и pingouin. Для групповых сравнений применяли однофакторный дисперсионный анализ с апостериорным тестом Тьюки. Для повторных временных рядов использовали линейные смешанные модели со случайным эффектом лунки или серии. Для AUC и отдельных непараметрических оценок рассчитывали перцентильные 95 % доверительные интервалы методом Bootstrap с 10 000 репликаций. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение. В 30-минутном окне наблюдения отрицательный контроль с ДТТ обеспечивал стабильную базовую линию флуоресценции ($(10,0 \pm 1,9) \times 10^3$ усл. ед.) без выраженного дрейфа. ОМУ 210 мкМ вызывал умеренное повышение сигнала на 17 % относительно контроля. Площадь под кривой AUC_{0-30} увеличивалась до $2,70 \times 10^5$ усл. ед. $\times$ мин, 95 % ДИ $2,18-3,20 \times 10^5$. Коэффициент фиксированного эффекта в смешанной модели составлял $+3\,654 \pm 1\,066$ усл. ед., $p = 0,0006$.

Тетрахлорметан вызывал выраженный ранний HyPer-ответ. При 50 мМ максимум флуоресценции достигал примерно 22 000 усл. ед. к 12-й минуте, а AUC_{0-30} увеличивалась до $4,14 \times 10^5$ усл. ед. $\times$ мин, $p = 0,025$. При 100 мМ AUC_{0-30} возрастала до $5,14 \times 10^5$ усл. ед. $\times$ мин, $p = 3,6 \times 10^{-4}$, а коэффициент β увеличивался до $+8\,994 \pm 2\,523$ усл. ед. Временной градиент был статистически значимым, $\beta = +40,9 \pm 7,8$ усл. ед. $\times$ мин $^{-1}$, $p < 10^{-7}$, но его вклад в общую дисперсию не превышал 6 %. Это указывает на преимущественно ранний характер изменения сигнала.

При 200 мМ ТХМ дополнительного увеличения HyPer-сигнала не наблюдали. Прирост β составил $+2\,679 \pm 2\,523$ усл. ед., $p = 0,288$, а AUC_{0-30} оставалась в пределах доверительного интервала контроля. Такой результат может быть связан с насыщением радикал-образующей ветви, ранним нарушением метаболической активности или потерей функционально активной части клеточной популяции в пределах наблюдаемого окна.

Добавление ОМУ сопровождалось увеличением HyPer-сигнала во всех сериях с ТХМ. При 50 мМ ТХМ β возрастал до $+13\,140 \pm 2\,523$ усл. ед., при 100 мМ до $+16\,210 \pm 2\,523$ усл. ед., а при 200 мМ до $+13\,850 \pm 2\,523$ усл. ед. AUC_{0-30} для комбинации 200 мМ ТХМ и ОМУ составляла $6,61 \times 10^5$ усл. ед. $\times$ мин и была сопоставима с показателем для 100 мМ ТХМ без ОМУ. Апостериорный тест Тьюки подтвердил превышение сигнала в сочетаниях ТХМ и ОМУ над соответствующими дозами ТХМ без ОМУ, минимальное $p = 0,0003$. Положительный контроль H_2O_2 1 мМ существенно отличался от всех остальных групп, $p < 0,001$.

Результаты по ТХМ согласуются с представлением о СYP-зависимом образовании радикальных интермедиатов и вторичном формировании H_2O_2 при перекисном окислении липидов. Усиление сигнала на фоне ОМУ не следует трактовать как прямое доказательство гепатопротекторного действия. Более корректно рассматривать его как признак изменения раннего окислительно-восстановительного ответа и возможного сохранения части функционально

активных клеток. Для проверки механизма необходимы прямые измерения перекисного окисления липидов, активности CYP2E1, состояния мембран и внутриклеточного pH.

Парацетамол формировал другой тип ответа. Вместо ожидаемого увеличения отношения F_{488}/F_{405} наблюдали выраженное отрицательное изменение нормированного сигнала относительно исходной линии. Через 12 мин после добавления 30 мМ ПРЦ Δ -сигнал составлял примерно $-1,1 \times 10^4$ усл. ед. При 60 мМ снижение достигало $-1,4 \times 10^4$ усл. ед. и углублялось до $-1,7 \times 10^4$ усл. ед. к 30-й минуте. Важно подчеркнуть, что отрицательным было изменение относительно R_0 , а не физическое значение самого ратиометрического отношения.

Введение ОМУ 210 мкМ не изменяло форму кривых в сериях с ПРЦ. Однофакторный дисперсионный анализ AUC выявил выраженный межгрупповой эффект, $F_{6,35} = 319,46$, $p = 4,8 \times 10^{-67}$, $\eta^2 = 0,884$. Апостериорный тест Тьюки не выявил значимых различий между 30 и 60 мМ ПРЦ, $p = 0,108$, а также между ПРЦ с ОМУ и без ОМУ, минимальное $p = 0,072$. В смешанной модели коэффициенты β для 30 и 60 мМ ПРЦ составили $-20\,736 \pm 1\,066$ и $-22\,991 \pm 1\,066$ усл. ед. соответственно, оба $p < 10^{-85}$. Ковариата времени не была статистически значимой, $\beta = -94 \pm 58$ усл. ед. $\times$ мин $^{-1}$, $p = 0,11$.

Снижение HyPer-сигнала в модели ПРЦ не следует интерпретировать как уменьшение образования H_2O_2 или как антиоксидантный эффект парацетамола. Вероятнее, оно отражает суммарный оптический ответ системы при тяжелом лекарственном стрессе. Возможными компонентами являются ацидоз цитозоля на фоне нарушения митохондриального метаболизма, pH-чувствительность YFP-домена HyPer, возможная модификация тиоловых групп сенсора и частичная потеря адгезии клеток. Поэтому данные по ПРЦ прежде всего демонстрируют ограничение модели HyPer при ацидозе и повреждении монослоя.

Отсутствие значимых различий между ПРЦ и ПРЦ с ОМУ в 30-минутном окне не доказывает отсутствия защитного действия ОМУ в целом. Корректнее заключить, что в условиях раннего ПРЦ-индуцированного стресса ОМУ не менял регистрируемую HyPer-кривую. Для оценки цитопротекторного действия в этой модели требуются независимые показатели pH, жизнеспособности, глутатионового статуса, митохондриального повреждения и морфологии монослоя.

Этанол, в отличие от ПРЦ, формировал положительный HyPer-ответ. Амплитуда сигнала постепенно возрастала при переходе от 2,5 % к 10 %. На всех уровнях

концентраций кривые располагались выше отрицательного контроля, однако не достигали уровня положительного контроля H_2O_2 1 мМ. Добавление ОМУ изменяло профиль ответа нелинейно. При 2,5 и 5 % этанола наблюдали ослабление сигнала, а при 10 % этанола регистрировали его усиление.

Средняя AUC_{0-30} в отрицательном контроле составила $2,25 \times 10^5$ усл. ед. $\times$ мин, перцентильный 95 % ДИ $1,72-2,75 \times 10^5$. При 2,5 % этанола AUC_{0-30} увеличивалась до $2,85 \times 10^5$ усл. ед. $\times$ мин, $\Delta +27\%$, $\beta = +5\,960 \pm 1\,084$ усл. ед., $z = 5,50$, $p = 3,8 \times 10^{-8}$. При 5 % этанола показатель возрастал до $3,10 \times 10^5$ усл. ед. $\times$ мин, $\beta = +8\,570 \pm 1\,084$ усл. ед., $p = 2,7 \times 10^{-15}$. При 10 % этанола AUC_{0-30} достигала $3,55 \times 10^5$ усл. ед. $\times$ мин, $\beta = +12\,960 \pm 1\,084$ усл. ед., $p < 10^{-32}$.

На фоне ОМУ AUC_{0-30} при 2,5 и 5 % этанола снижалась до $2,40 \times 10^5$ и $2,60 \times 10^5$ усл. ед. $\times$ мин соответственно. Это соответствовало уменьшению на 19 % и 16 % по сравнению с соответствующими этанольными группами. Для 2,5 % этанола эффект имел характер тенденции, $p = 0,158$, для 5 % был статистически значимым, $p = 0,0015$. При 10 % этанола ОМУ повышал AUC_{0-30} до $3,90 \times 10^5$ усл. ед. $\times$ мин, $\Delta +10\%$, $\beta = +16\,470 \pm 1\,084$ усл. ед., $p = 8,0 \times 10^{-53}$. Межгрупповой эффект по ANOVA был выраженным, $F_{7,42} = 147,3$, $p = 2,1 \times 10^{-57}$, $\eta^2 = 0,832$.

Наблюдаемый градиент при воздействии этанола может отражать активацию микросомальной этанол-окисляющей системы и повышение образования активных форм кислорода. При умеренной нагрузке ОМУ снижал интегральный HyPer-ответ, что согласуется с антиоксидантной модуляцией. При 10 % этанола увеличение сигнала на фоне ОМУ можно рассматривать как возможную транзиторную прооксидантную фазу при высокой радикальной нагрузке. Эта интерпретация требует осторожности, поскольку для подтверждения адаптивного ответа необходимы показатели Nrf2/ARE-сигналинга, глутатионового обмена и жизнеспособности.

В целом стабильная линия IAR-2 HyPer позволила сопоставить ранние ответы на три токсиканта с различными первичными механизмами действия. В модели ТХМ регистрировали быстрый положительный ответ с признаками насыщения при предельной нагрузке. В модели ПРЦ выявлено ограничение рН-чувствительного сенсора в условиях раннего лекарственного стресса. В модели этанола наблюдали более плавное дозозависимое увеличение сигнала и двухфазную модуляцию на фоне ОМУ. Эти различия подтверждают, что HyPer-сигнал должен оцениваться не изолированно, а в связи с морфологией монослоя, жизнеспособностью, рН и биохимическими маркерами повреждения.

Ограничения исследования. Основным ограничением работы является рН-чувствительность исходного HyPer-сенсора. Это особенно важно для модели парацетамола, где вероятный ацидоз и повреждение монослоя могут искажать прямую интерпретацию сигнала как показателя внутриклеточного H_2O_2 . Дополнительное ограничение связано с использованием высоких концентраций токсикантов как кратковременной провокационной нагрузки. Они позволяют выявить предельные режимы ответа, но не предназначены для прямой физиологической экстраполяции.

Дальнейшая валидация модели должна включать независимый контроль внутриклеточного рН, расширение диапазона более низких концентраций, прямые маркеры жизнеспособности, перекисного окисления липидов, глутатионового статуса, активности CYP2E1 и митохондриального повреждения.

Заключение. Стабильная клеточная линия IAR-2 HyPer пригодна для сравнительной регистрации раннего ратиометрического ответа клеток печени на токсиканты различной природы. В модели тетрахлорметана выявлен быстрый положительный HyPer-ответ с признаками насыщения при предельной токсической нагрузке. В модели парацетамола показано методологическое ограничение сенсора при вероятном ацидозе и повреждении монослоя. В модели этанола зафиксирована дозозависимая положительная динамика с двухфазной модуляцией на фоне ОМУ.

Оксиметилурацил может рассматриваться как потенциальный модификатор раннего окислительно-восстановительного ответа, однако выводы о его гепатопротекторном действии должны подтверждаться независимыми биохимическими и цитологическими маркерами. Наиболее корректная область применения IAR-2 HyPer в данной постановке - сравнительный анализ ранней кинетики H_2O_2 -зависимого сигнала и выявление условий, при которых необходимы дополнительные контрольные измерения.

Список литературы:

1. Sies H. Hydrogen peroxide as a central redox signaling molecule in physiological oxidative stress. Oxidative eustress. Redox Biology. 2017. Vol. 11. P. 613-619. DOI 10.1016/j.redox.2016.12.035.
2. Forman H.J., Maiorino M., Ursini F. Signaling functions of reactive oxygen species. Free Radical Biology and Medicine. 2010. Vol. 49. No. 11. P. 1630-1638.
3. Stone J.R., Yang S. Hydrogen peroxide. A signaling messenger. Antioxidants and Redox Signaling. 2006. Vol. 8. No. 3-4. P. 243-270.

4. Lennicke C., Rahn J., Lichtenfels R., Wessjohann L.A., Seliger B. Hydrogen peroxide - production, fate and role in redox signaling of tumor cells. *Cell Communication and Signaling*. 2015. Vol. 13. Article 39. DOI 10.1186/s12964-015-0118-6.
5. Begriche K., Massart J., Robin M.A., Borgne-Sanchez A., Fromenty B. Drug-induced toxicity on mitochondria and lipid metabolism, mechanistic diversity and deleterious consequences for the liver. *Journal of Hepatology*. 2011. Vol. 54. No. 4. P. 773-794. DOI 10.1016/j.jhep.2010.11.006.
6. Jaeschke H., McGill M.R., Ramachandran A. Oxidant stress, mitochondria and cell death mechanisms in drug-induced liver injury. Lessons learned from acetaminophen hepatotoxicity. *Drug Metabolism Reviews*. 2012. Vol. 44. No. 1. P. 88-106. DOI 10.3109/03602532.2011.602688.
7. Slater T.F., Cheeseman K.H., Ingold K.U. Carbon tetrachloride toxicity as a model for studying free-radical mediated liver injury. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*. 1985. Vol. 311. No. 1152. P. 633-645. DOI 10.1098/rstb.1985.0169.
8. Poli G. et al. Separation and characterization of aldehydic products of lipid peroxidation stimulated by carbon tetrachloride or ADP-iron in isolated rat hepatocytes and rat liver microsomal suspensions. *Biochemical Journal*. 1985. Vol. 227. No. 2. P. 629-638. DOI 10.1042/bj2270629.
9. Yan M., Huo Y., Yin S., Hu H. Mechanisms of acetaminophen-induced liver injury and its implications for therapeutic interventions. *Redox Biology*. 2018. Vol. 17. P. 274-283. DOI 10.1016/j.redox.2018.04.019.
10. Ramachandran A., Jaeschke H. Mechanisms of acetaminophen hepatotoxicity and their translation to human pathophysiology. *Journal of Clinical and Translational Research*. 2017.
11. Teschke R. Microsomal ethanol-oxidizing system. Success over 50 years and an encouraging future. *Alcoholism, Clinical and Experimental Research*. 2019. Vol. 43. P. 386-400. DOI 10.1111/acer.13961.
12. Lieber C.S. The discovery of the microsomal ethanol oxidizing system and its physiologic and pathologic role. *Drug Metabolism Reviews*. 2004.
13. Kalyanaraman B. et al. Measuring reactive oxygen and nitrogen species with fluorescent probes. Challenges and limitations. *Free Radical Biology and Medicine*. 2012. Vol. 52. No. 1. P. 1-6.
14. Belousov V.V. et al. Genetically encoded fluorescent indicator for intracellular hydrogen peroxide. *Nature Methods*. 2006. Vol. 3. No. 4. P. 281-286. DOI 10.1038/nmeth866.

15. Bilan D.S. et al. HyPer-3. A genetically encoded H_2O_2 probe with improved performance for ratiometric and fluorescence lifetime imaging. *ACS Chemical Biology*. 2013. Vol. 8. No. 3. P. 535-542. DOI 10.1021/cb300625g.
16. Pak V.V. et al. Ultrasensitive genetically encoded indicator for hydrogen peroxide identifies roles for the oxidant in cell migration and mitochondrial function. *Cell Metabolism*. 2020. DOI 10.1016/j.cmet.2020.02.003.
17. Weller J., Kizina K.M., Can K., Bao G., Müller M. Response properties of the genetically encoded optical H_2O_2 sensor HyPer. *Free Radical Biology and Medicine*. 2014. Vol. 76. P. 227-241. DOI 10.1016/j.freeradbiomed.2014.07.045.
18. Wu D., Cederbaum A.I. Oxidative stress mediated toxicity exerted by ethanol-inducible CYP2E1. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2005. Vol. 207. No. 2. P. 70-76.
19. Бакиров А.Б., Репина Э.Ф., Каримов Д.О., Байгильдин С.С., Гимадиева А.Р., Якупова Т.Г., Тимашева Г.В., Хуснутдинова Н.Ю. Эффективность применения оксиметилурацила на модели острой алкогольной интоксикации. *Гигиена и санитария*. 2021. Т. 100. № 11. С. 1287-1291.
20. Murinov Yu.I. Pro- and antioxidant properties of uracil derivatives. *Russian Journal of General Chemistry*. 2019.

References:

1. Sies H. Hydrogen peroxide as a central redox signaling molecule in physiological oxidative stress. *Oxidative eustress. Redox Biology*. 2017. 11. 613-619. DOI 10.1016/j.redox.2016.12.035.
2. Forman H.J., Maiorino M., Ursini F. Signaling functions of reactive oxygen species. *Free Radical Biology and Medicine*. 2010. 49(11). 1630-1638.
3. Stone J.R., Yang S. Hydrogen peroxide. A signaling messenger. *Antioxidants and Redox Signaling*. 2006. 8(3-4). 243-270.
4. Lennicke C., Rahn J., Lichtenfels R., Wessjohann L.A., Seliger B. Hydrogen peroxide - production, fate and role in redox signaling of tumor cells. *Cell Communication and Signaling*. 2015. 13. 39. DOI 10.1186/s12964-015-0118-6.
5. Begriche K., Massart J., Robin M.A., Borgne-Sanchez A., Fromenty B. Drug-induced toxicity on mitochondria and lipid metabolism, mechanistic diversity and deleterious consequences for the liver. *Journal of Hepatology*. 2011. 54(4). 773-794. DOI 10.1016/j.jhep.2010.11.006.
6. Jaeschke H., McGill M.R., Ramachandran A. Oxidant stress, mitochondria and cell death mechanisms in drug-induced liver injury. Lessons learned from acetaminophen hepatotoxicity. *Drug Metabolism Reviews*. 2012. 44(1). 88-106. DOI 10.3109/03602532.2011.602688.

7. Slater T.F., Cheeseman K.H., Ingold K.U. Carbon tetrachloride toxicity as a model for studying free-radical mediated liver injury. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*. 1985. 311(1152). 633-645. DOI 10.1098/rstb.1985.0169.
8. Poli G. et al. Separation and characterization of aldehydic products of lipid peroxidation stimulated by carbon tetrachloride or ADP-iron in isolated rat hepatocytes and rat liver microsomal suspensions. *Biochemical Journal*. 1985. 227(2). 629-638. DOI 10.1042/bj2270629.
9. Yan M., Huo Y., Yin S., Hu H. Mechanisms of acetaminophen-induced liver injury and its implications for therapeutic interventions. *Redox Biology*. 2018. 17. 274-283. DOI 10.1016/j.redox.2018.04.019.
10. Ramachandran A., Jaeschke H. Mechanisms of acetaminophen hepatotoxicity and their translation to human pathophysiology. *Journal of Clinical and Translational Research*. 2017.
11. Teschke R. Microsomal ethanol-oxidizing system. Success over 50 years and an encouraging future. *Alcoholism, Clinical and Experimental Research*. 2019. 43. 386-400. DOI 10.1111/acer.13961.
12. Lieber C.S. The discovery of the microsomal ethanol oxidizing system and its physiologic and pathologic role. *Drug Metabolism Reviews*. 2004.
13. Kalyanaraman B. et al. Measuring reactive oxygen and nitrogen species with fluorescent probes. Challenges and limitations. *Free Radical Biology and Medicine*. 2012. 52(1). 1-6.
14. Belousov V.V. et al. Genetically encoded fluorescent indicator for intracellular hydrogen peroxide. *Nature Methods*. 2006. 3(4). 281-286. DOI 10.1038/nmeth866.
15. Bilan D.S. et al. HyPer-3. A genetically encoded H_2O_2 probe with improved performance for ratiometric and fluorescence lifetime imaging. *ACS Chemical Biology*. 2013. 8(3). 535-542. DOI 10.1021/cb300625g.
16. Pak V.V. et al. Ultrasensitive genetically encoded indicator for hydrogen peroxide identifies roles for the oxidant in cell migration and mitochondrial function. *Cell Metabolism*. 2020. DOI 10.1016/j.cmet.2020.02.003.
17. Weller J., Kizina K.M., Can K., Bao G., Müller M. Response properties of the genetically encoded optical H_2O_2 sensor HyPer. *Free Radical Biology and Medicine*. 2014. 76. 227-241. DOI 10.1016/j.freeradbiomed.2014.07.045.
18. Wu D., Cederbaum A.I. Oxidative stress mediated toxicity exerted by ethanol-inducible CYP2E1. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2005. 207(2). 70-76.

19. Bakirov A.B., Repina E.F., Karimov D.O., Baigildin S.S., Gimadieva A.R., Yakupova T.G., Timasheva G.V., Khusnutdinova N.Yu. The effectiveness of oxymethyluracil in a model of acute alcohol intoxication. *Gigiena i Sanitariya*. 2021. 100(11). 1287-1291. In Russian.
20. Murinov Yu.I. Pro- and antioxidant properties of uracil derivatives. *Russian Journal of General Chemistry*. 2019.

Информация об авторах

Каримов Денис Олегович - кандидат медицинских наук, заведующий отделом токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», ведущий научный сотрудник отдела исследований общественного здоровья ФГБНУ «Национальный НИИ общественного здоровья имени Н.А. Семашко», e-mail karimovdo@gmail.com, ORCID iD 0000-0003-0039-6757.

Якупова Татьяна Георгиевна - научный сотрудник лаборатории генетики отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail tanya.kutlina.92@mail.ru, ORCID iD 0000-0002-1236-8246.

Рябова Юлия Владимировна - кандидат медицинских наук, заведующая лабораторией токсикологии отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail ryabovaiuvl@gmail.com, ORCID iD 0000-0003-2677-0479.

Репина Эльвира Фаридовна - кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник лаборатории токсикологии отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail e.f.repina@bk.ru, ORCID iD 0000-0001-8798-0846.

Кудояров Эльдар Ренатович - младший научный сотрудник отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail e.kudoyarov@yandex.ru, ORCID iD 0000-0002-2092-1021.

Каримов Денис Дмитриевич - кандидат биологических наук, заведующий лабораторией генетики отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», e-mail lich-tsar@mail.ru, ORCID iD 0000-0002-1962-2323.

Гарипова Зарина Ринатовна - преподаватель кафедры профессиональной подготовки ФГКОУ ВО УЮИ МВД России, e-mail gzh1990@mail.ru.

Author information

Karimov Denis Olegovich - Candidate of Medical Sciences, Head of the Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Laboratory Animal Clinic, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Leading Researcher, Department of Public Health Research, N.A. Semashko National Research Institute of Public Health, e-mail karimovdo@gmail.com, ORCID iD 0000-0003-0039-6757.

Yakupova Tatiana Georgievna - Researcher, Genetics Laboratory, Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Laboratory Animal Clinic, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail tanya.kutlina.92@mail.ru, ORCID iD 0000-0002-1236-8246.

Ryabova Yulia Vladimirovna - Candidate of Medical Sciences, Head of the Toxicology Laboratory, Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Laboratory Animal Clinic, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail ryabovaiuvl@gmail.com, ORCID iD 0000-0003-2677-0479.

Repina Elvira Faridovna - Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, Toxicology Laboratory, Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Laboratory Animal Clinic, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail e.f.repina@bk.ru, ORCID iD 0000-0001-8798-0846.

Kudoyarov Eldar Renatovich - Junior Researcher, Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Laboratory Animal Clinic, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail e.kudoyarov@yandex.ru, ORCID iD 0000-0002-2092-1021.

Karimov Denis Dmitrievich - Candidate of Biological Sciences, Head of the Genetics Laboratory, Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Laboratory Animal Clinic, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, e-mail lich-tsar@mail.ru, ORCID iD 0000-0002-1962-2323.

Garipova Zarina Rinatovna - Lecturer, Department of Professional Training, Ufa Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, e-mail gzh1990@mail.ru.

Поступила/Received: 29.05.2026

Принята в печать/Accepted: 11.09.2026

УДК: 613.26:613.6.01

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ *CHLORELLA* В КАЧЕСТВЕ БИОПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО СРЕДСТВА (ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР)

Гертан Н.А.¹, Минигалиева И.А.^{1,2}, Сутункова М.П.^{1,3}, Куляшова П.Д.¹, Гурвич В.Б.¹,
Мажаева Т.В.¹

¹ ФБУН «Екатеринбургский медицинский – научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора, Екатеринбург, Россия

² ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России, Екатеринбург, Россия

³ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

В современном мире микроводоросли рода *Chlorella* широко используются в различных отраслях науки и промышленности, например, в качестве моделей исследований, пищевых добавок, компонентов очистных систем, что обусловлено высоким содержанием в них биологически активных соединений и способностью к быстрому размножению.

Цель исследования – изучение полезных свойств микроводорослей рода *Chlorella* и возможности их использования в качестве биопрофилактического средства негативного воздействия окружающей среды и производственных факторов.

Материал и методы. Для выявления ключевых литературных источников были задействованы базы данных и электронные библиотеки eLIBRARY.RU, PubMed и Google Scholar. В качестве критерия включения выступали сведения об эффектах воздействия водорослей рода *Chlorella*. Были исключены исследования, опубликованные до 2015 года и описывающие микроводоросли других родов.

Результаты. Изучив литературные источники, были выявлены основные полезные свойства микроводорослей рода *Chlorella*: антиоксидантные, противовоспалительные, антиапоптотические и сорбирующие. Рассмотрены варианты обогащения основных продуктов питания и возможные ограничения, связанные с сохранением их полезных свойств, доступностью и безопасностью.

Ограничения исследования. В анализ были включены только публикации на русском и английском языках с 2016 по 2026 годы. Использование ограниченного

числа баз данных не исключает возможности пропуска релевантных исследований, опубликованных в других источниках

Заключение. В совокупности свойства микроводорослей рода *Chlorella* позволяют предполагать их эффективность в качестве биопрофилактического средства, направленного на повышение устойчивости организма к вредному воздействию токсикантов, а обнаруженные ограничения не являются абсолютным препятствием, но требуют дополнительного изучения.

Ключевые слова: микроводоросли, хлорелла, биологически активные вещества, антиоксидантные свойства, противовоспалительные свойства, сорбенты, биопрофилактика

Соблюдение этических стандартов: проведение настоящего исследования не требовало одобрения этического комитета, поскольку работа не связана с использованием человека или животных в качестве объектов исследования.

Использование инструментов искусственного интеллекта: авторы заявляют, что при подготовке настоящей рукописи системы искусственного интеллекта не применялись.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Гертан Н.А., Минигалиева И.А., Сутункова М.П., Куляшова П.Д., Гурвич В.Б., Мажаева Т.В. Использование микроводорослей *chlorella* в качестве биопрофилактического средства (литературный обзор). Медицина труда и экология человека. 2026; 3:287-304.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10315>

Для корреспонденции: Наталья Александровна Гертан, e-mail: gertan00@mail.ru

APPLICATION OF CHLORELLA VULGARIS AS A BIOPROPHYLLACTIC AGENT

(A LITERATURE REVIEW)

Gertan N.A.¹, Minigalieva I.A.^{1,2}, Sutunkova M.P.^{1,3}, Kulyashova P.D.¹, Gurvich V.B.¹, Mazhaeva T.V.¹

¹Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, Russian Federation

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

³Ural State Medical University, Yekaterinburg, Russian Federation

Chlorella microalgae are widely used in various fields of science and industry today, for example, as research models, food additives, components of sewage treatment systems, owing to their high content of biologically active compounds and rapid reproduction.

The aim of this study was to investigate the advantages of *Chlorella* and its potential use as a bioprophylactic agent of the negative effects of the environment and industrial factors.

Materials and Methods. eLIBRARY.RU, PubMed, and Google Scholar databases and electronic libraries were used to identify key literature sources. Information on the effects of *Chlorella* microalgae was used as an inclusion criterion. Studies published before 2015 and describing microalgae of other genera were excluded.

Results. The article describes the key benefits of *Chlorella vulgaris* attributed to its antioxidant, anti-inflammatory, anti-apoptotic, and sorbent properties, discusses options for fortifying staple foods and potential limitations associated with preserving their beneficial properties, availability, and safety.

Study limitations. Russian and English-language publications issued in 2016–2026 were included in the analysis. The use of a limited number of databases does not exclude that relevant studies published elsewhere were omitted.

Conclusion. Taken together, the properties of microalgae of the genus *Chlorella* suggest their effectiveness as a bioprophylactic agent aimed at increasing the resistance of the human organism to adverse effects of toxicants. The identified limitations are not an absolute obstacle but require further research.

Keywords: microalgae, *Chlorella*, food supplements, antioxidant properties, anti-inflammatory properties, sorbents, bioprophylaxis

Compliance with ethical standards: This study did not require approval from an ethics committee, as it did not involve the use of humans or animals as research subjects.

Declaration of AI use: The authors declare that no artificial intelligence tools were used in the preparation of this manuscript.

Conflict of interest: The authors have no conflicts of interest to declare.

Funding: This research received no external funding.

For citation: Gertan N.A., Minigalieva I.A., Sutunkova M.P., Kulyashova P.D., Gurvich V.B., Mazhaeva T.V. Application of *Chlorella vulgaris* as a bioprophylactic agent (a literature review). Occupational Health and Human Ecology. 2026; 3:287-304.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10315>

For correspondence: Natalia A. Gertan, e-mail: gertan00@mail.ru

Микроводоросли рода *Chlorella* относятся к отряду *Chlorococcales*, семейству *Chlorellaceae* и представляют собой одноклеточные организмы сферической или овальной формы размером 2–10 мкм. Широко известны виды *Chlorella vulgaris* (*C. vulgaris*), *Chlorella pyrenoidosa* (*C. pyrenoidosa*), *Chlorella protothecoides* (*C. Protothecoides*), *Chlorella sorokiniana* (*C. sorokiniana*). Их использование становится всё более распространено в различных отраслях науки и промышленности, в том числе сельскохозяйственной, химической, пищевой, фармацевтической, что связано с их биологической и экономической эффективностью, обусловленной высоким содержанием биологически активных соединений и способностью к быстрому размножению⁵³ [1-3].

Особый интерес представляет использование данных микроводорослей в качестве пищевой добавки. По литературным данным *Chlorella* содержат много полезных белков, липидов, углеводов, витаминов и минералов, и соответственно обладает высокой питательной ценностью [2-5]. Более того, есть данные о высокой антиоксидантной и противовоспалительной активности, а также сорбирующих свойствах микроводорослей [2, 5]. Биопрофилактика необходима для населения и, в особенности, контингенту, работающему во вредных производственных условиях.

Таким образом, **целью исследования** стало изучение полезных свойств микроводорослей рода *Chlorella* и возможности их использования в качестве биопрофилактического средства.

Материал и методы. Для выявления ключевых литературных источников были задействованы базы данных и электронные библиотеки eLIBRARY.RU, PubMed и Google Scholar. Поиск осуществлялся на русском и английском языках с использованием определённых ключевых слов: микроводоросли, хлорелла, биологически активные вещества, антиоксидантные свойства, противовоспалительные свойства, сорбенты, биопрофилактика, microalgae, chlorella, biologically active substances, antioxidant properties, anti-inflammatory

⁵³ Патент RU2692654 C2. НОВЫЕ НЕАЛЛЕРГЕННЫЕ ЛЕГКИЕ ЗАКУСКИ, СОДЕРЖАЩИЕ РАСТИТЕЛЬНЫЕ БЕЛКИ / С. ЛЯГАШ, Л. РЕТУРН, Ж. ЛИС, Ф. МАРКИЙИ. – 2019.

properties, sorbents, bioprophylaxis. Списки литературы включенных исследований были изучены с целью поиска дополнительных статей. В качестве критерия включения выступали сведения об эффектах воздействия микроводорослей рода *Chlorella* на организм человека. Были исключены исследования, опубликованные до 2015 года и описывающие микроводоросли других родов. Всего было включено 50 исследований (37 за последние 5 лет).

Результаты и обсуждение.

Питательная ценность микроводорослей рода Chlorella

Микроводоросли рода *Chlorella* характеризуются богатым содержанием биологических компонентов, обеспечивающих их высокую питательную ценность и некоторые полезные свойства, необходимые для биопрофилактической эффективности [6-8]. Так, в их составе содержатся каротиноиды, фенольные соединения, лимонная кислота, токоферолы и рутин, известные своими антиоксидантными свойствами [2, 6-8], биологически активные липиды, включая как насыщенные, так и полиненасыщенные жирные кислоты [5, 9, 10], уровень которых в *C. vulgaris* положительно коррелирует с их антиоксидантной активностью [9], и полисахариды, способные нейтрализовать свободные радикалы, повышать активность ферментов, связанных с устойчивостью к окислительному стрессу, и обладающие способностью к хелатированию металлов [11].

Кроме того, *Chlorella* обладают высоким содержанием микроэлементов и витаминов, таких как фосфор, натрий, калий, магний, железо, кальций, медь, марганец, цинк, и витамины (Р, А, К, В1, В2, В3, В6, В12) [1, 6, 8, 12], многие из которых могут снижать окислительный стресс и воспаление [6, 12, 13], в том числе посредством взаимодействия с сигнальными путями эритроидного ядерного фактора 2-го типа (Nrf2) и ядерного фактора «каппа-би» (NF-κB), регулируемыми выработку антиоксидантных ферментов и провоспалительных цитокинов [8, 14, 15].

Антиоксидантные свойства микроводорослей рода Chlorella

Рассматривая особенности биопрофилактического эффекта микроводорослей рода *Chlorella* нельзя не выделить их антиоксидантные свойства, за счёт которых они могут снижать окислительный стресс, в том числе индуцированный вредными химическими производственными факторами [8]. Подобный эффект может быть обусловлен их способностью нейтрализовать свободные радикалы [7-9], подавлять работу ферментов НАДФН-оксидазы [16], активировать путь Nrf2 /

гемоксигеназы-1 [17, 18], а также ингибировать образование малонового диальдегида и поддерживать баланс окислительно-восстановительной системы за счёт регуляции уровней антиоксидантов [2, 5, 8, 17, 19, 20].

Противовоспалительные и антиапоптотические свойства микроводорослей рода Chlorella

Противовоспалительные свойства микроводорослей рода *Chlorella* также были зафиксированы во многих исследованиях, что значительно повышает их эффективность в качестве биопрофилактического средства. Например, *C. pyrenoidosa* и *C. vulgaris* подавляли денатурацию альбумина [10], стимулировали активацию иммунной системы, способствуя увеличению пула регуляторных Т-клеток [21], ингибировали транскрипционный фактор NF-κB [17], индуцибельную синтазу оксида азота и циклооксигеназу-2 [20], что приводило к снижению продукции воспалительных цитокинов (фактора некроза опухоли, простагландина E2 и интерлейкина-6, трансформирующего фактора роста β1, оксида азота) [8, 16-18, 22, 23], подавляли экспрессию мРНК инфламماسомы NLRP3 (NLR family pyrin domain containing 3), что способствовало снижению иммуноэкспрессии каспазы-1 и последующей иммуноэкспрессии миелопероксидазы [17], тем самым обеспечивая противовоспалительный эффект. Кроме того, использование *C. vulgaris* приводило к положительным изменениям в составе кишечной микробиоты, что усиливало синтез короткоцепочечных жирных кислот [21], играющих важную роль в адаптивных иммунных функциях [24].

Некоторые исследования продемонстрировали также антиапоптотический эффект *C. vulgaris* (6%, 300 мг/кг м.т.) за счет уменьшения уровней маркеров апоптоза каспазы-3 и белка Вах и повышения экспрессии антиапоптотического гена регулятора апоптоза *Bcl-2* [17, 25].

Сорбирующие свойства микроводорослей рода Chlorella

Известна высокая сорбирующая способность микроводорослей в водных системах. Микроводоросли *C. sorokiniana* и *C. vulgaris* и продукты их переработки показали свою эффективность в удалении как неорганических, так и органических загрязнителей из водного раствора, что, вероятно, обусловленную содержанием функциональных групп (карбоксильные, amino- и гидроксильные) на своей поверхности, которые могут участвовать в процессе биосорбции посредством ионного обмена, а также механической и промежуточной абсорбции [26-28].

Исследование Yadav M. и соавт. показало высокую сорбционную активность *C. vulgaris* (500 и 1000 мг/70 кг м.т.) в живых системах – наблюдалось значительное

снижение накопления стронция и таллия в организме мышей и увеличение их выведения с калом и мочой [29]. Это позволяет предполагать эффективность *Chlorella* в удалении вредных химических соединений из организма человека и снижении таким образом токсических эффектов.

Биопрофилактика негативного воздействия окружающей среды микроводорослями рода Chlorella

Защитный эффект *Chlorella* наблюдался в исследованиях токсического воздействия различных соединений (нитрит натрия 80 мг/кг м.т., флуоксетин 170 и 510 мг/кг м.т., глутамат натрия 1200 мг/кг в день, цисплатин 1,34 мг/кг м.т., доксорубин 3 мг/кг м.т.) – *C. vulgaris* (70 мг/кг м.т., 150 мг/кг м.т., 300 мг/кг м.т., 500 мг/кг м.т.) подавляли вызванные ими воспаление, окислительный стресс, апоптоз, а также гепатотоксические [18, 30, 31], нефротоксические [18], спленотоксические [18], репротоксические (у самцов и самок) [25, 31-33], тератогенные и эмбриотоксические эффекты [31].

Более того, *Chlorella* были эффективны в биопрофилактике негативного воздействия тяжёлых металлов, что особенно полезно для рабочих промышленных предприятий, подверженных воздействию данных соединений. В частности, *C. vulgaris* (500 мг/кг м.т., 15 г/кг м.т.) предотвращали индуцированные хлоридом кадмия (2 мг/кг м.т., 2,5 мг/л) окислительный стресс и воспаление, а также снижали повреждение печени, почек и репродуктивных органов, в том числе на генетическом уровне, за счет поддержания клеточного окислительно-восстановительного гомеостаза, снижения воспалительных эффектов, апоптоза и повышения выживаемости клеток [8, 34, 35].

Исследования показали, что они также могут использоваться в качестве биопрофилактического средства при различных заболеваниях, в том числе хронической обструктивной болезни лёгких [36], сахарном диабете 2 типа [37] и метаболически ассоциированной жировой болезни печени [38].

Благоприятный эффект использования данных микроводорослей был отмечен и в клинических исследованиях, что проявлялось в улучшении общего состояния добровольцев и их антиоксидантного статуса, снижении у них маркеров окислительного стресса и старения (тиобарбитуратных реактивных веществ, 8-гидрокси-дезоксигуанозина, малонового диальдегида), а также значительной защите печени (за счет снижения глутамат-оксалоацетаттрансаминазы и глутамат-пируваттрансаминазы) [20, 39].

Кроме того, микроводоросли *Chlorella* обладают антибактериальной активностью в отношении грамположительных и грамотрицательных патогенных бактерий [8, 40-42], что в сочетании с их противовоспалительными, антиоксидантными и антиапоптотическими свойствами положительно влияет на микробиоту кишечника и метаболический гомеостаз [21, 36].

Обогащение продуктов питания микроводорослями рода Chlorella

Несмотря на многочисленные полезные свойства данных микроводорослей, их употребление в пищу в чистом виде может вызвать затруднения из-за специфических органолептических свойств. Поэтому для внедрения *C. vulgaris* в повседневное питание или рационы лечебно-профилактического питания в качестве одного из профилактических мероприятий на производстве необходимо предусмотреть различные варианты их употребления, в том числе в составе привычных продуктов питания.

Обогащение продуктов питания микроводорослями *Chlorella* может повысить пищевую ценность продукта и функциональные свойства, включая абсорбцию, ослабляя таким образом процессы интоксикации и способствуя сохранению и укреплению здоровья людей [43].

Изучали возможность обогащения зерновых [43, 44], молочных [45] и кисломолочных продуктов [46], какао [47]. В конечных продуктах отмечали увеличение содержания полезных макро- и микроэлементов (хлебные палочки, сыр, какао), ускорение ферментации (айран) и повышенную антиоксидантную активность (сыр). Органолептические показатели претерпевали изменения, в основном связанные с консистенцией, цветом и запахом, но оставались удовлетворительными при небольшой доли включения водорослей. Однако избыточное включение *Chlorella* (14%) в рацион может негативно сказаться на усвояемости продукта и неоднозначно влиять на микробиоту кишечника [19], что необходимо учитывать при разработке обогащённого продукта.

Нормативно-правовые аспекты безопасности использования микроводорослей рода Chlorella

Зарубежом для микроводорослей рода *Chlorella* Регламент (ЕС) № 396/2005⁵⁴ устанавливает допустимый максимальный уровень содержания в них ртути (0,01 мг/кг), меди (20,0 мг/кг м.т.) и других соединений. На территории Российской

⁵⁴ Algae and prokaryotes organisms. Product details. Food Safety. European Commission. URL: <https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-database/start/screen/products/details/200> (Дата обращения: 04.05.2026)

федерации безопасность их использования для изготовления биологически активных добавок к пище регламентируется техническим регламентом Таможенного союза⁵⁵ «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011), который устанавливает допустимый уровень микробиологических и химических показателей, в том числе содержания в них мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов не более 1×10^4 КОЕ/г, бактерий группы кишечных палочек (не допускается в 0,1 г продукта), *E.coli* (не допускается в 1,0 г продукта), плесени и дрожжей не более 100 КОЕ/г (ТР ТС 021/2011, Приложение 2, таблица 1.9); свинца не более 2,0 мг/кг, мышьяка 1,0 мг/кг, кадмия 1,0 мг/кг, ртути 0,1 мг/кг (ТР ТС 021/2011, Приложение 3, таблица 10); а также пестицидов: гексахлоран и дихлордифенилтрихлорэтан не более 0,1 мг/кг, нитратов не более 1000 мг/кг. Содержание диоксинов, гептахлора и алдрина не допускается (ТР ТС 021/2011, Приложение 3, таблица 10).

*Возможные ограничения использования микроводорослей рода *Chlorella**

Необходимо отметить ряд возможных трудностей и ограничений при использовании микроводорослей рода *Chlorella* в качестве биопрофилактического средства. Несмотря на многочисленные данные об их пищевой и биологической ценности некоторые эффекты их употребления изучены недостаточно. Так, при сравнении различных экстрактов *C. vulgaris* один из образцов вызывал выраженные тонические сокращения изолированных гладких мышц желудка, сопровождающиеся усилением экспрессии интерлейкина-1 β и снижением иммунореактивности фермента нейрональной синтазы оксида азота, что указывает на обширную провоспалительную активацию наряду с сильным спазмогенным потенциалом. Данный эффект может быть полезен при нарушениях моторики желудочно-кишечного тракта с воспалительными компонентами, однако он требует осторожности при гипермоторике [10].

Высокие сорбционные свойства микроводорослей при несоблюдении санитарных норм и правил на любом из этапов производства или обработки могут привести к накоплению в них поллютантов или патогенных микроорганизмов, что делает необходимым строгий контроль показателей безопасности [2]. Вариативность антибактериальных свойств микроводорослей рода *Chlorella*, зависящая от штамма, условий выращивания и способа экстракции [40], также представляет проблему с точки зрения стандартизации и обеспечения стабильного качества продукта.

⁵⁵ Технический регламент Таможенного союза (ТР ТС 021/2011). «О безопасности пищевой продукции». URL: <https://docs.cntd.ru/document/902320560> (дата обращения 04.05.2026)

Кроме того, было обнаружено, что эффект от употребления *Chlorella* зависит от состояния их кишечной микрофлоры человека, что указывает на важность дифференцированного подхода к питанию с учетом данного факта [48]. Отмечают также вероятное снижение питательной ценности и эффективности *Chlorella*, связанные с трудностью её усвоения организмом из-за плотной клеточной стенки [49], однако в настоящее время активно разрабатываются методы, направленные на повышение доступности питательных веществ посредством добавления функциональных ферментов, способных разрушать клеточную стенку [50, 51].

Необходимо также учитывать экономические аспекты и ограничения, связанные с масштабом производства данных микроводорослей. Уровень полезных компонентов и метаболитов, их антиоксидантная активность может колебаться в зависимости от условий выращивания микроводоросли [7], что с одной стороны потенциально позволит определить наиболее эффективный метод выращивания и контролировать антиоксидантную активность, а с другой требует дополнительных промышленных ресурсов и контроля антиоксидантной активности.

Несмотря на обозначенные трудности, глобальное производство микроводорослей относительно стабильно и достигает приблизительно 30 000 тонн сухого веса всей биомассы микроводорослей [52, 53]. Хотя в России фактический уровень освоения природных ресурсов водорослей остаётся невысоким – около 8 000 тонн по данным Федерального агентства по рыболовству [54], перспективы их использования в качестве биопрофилактического средства заслуживают внимания и требуют дополнительного изучения.

Заключение. Изучив многочисленные полезные свойства микроводоросли рода *Chlorella*, в том числе антиоксидантные, противовоспалительные, антиапоптотические и сорбирующие, можно сделать вывод о возможности их использования в качестве биопрофилактического средства, в том числе при вредных условиях труда. Однако необходимо проведение дополнительных исследований, направленных на повышение биодоступности и безопасности их использования для человека.

Вклад авторов

Концепция и дизайн исследования – Минигалиева И.А., Сутункова М.П., Гурвич В.Б.
Сбор и обработка литературных данных – Гертан Н.А., Куляшова П.Д., Мажаева Т.В.
Написание текста и оформление статьи – Гертан Н.А., Куляшова П.Д.

Все соавторы – редактирование, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех ее частей.

Author contributions

Study conception and design – Minigalieva I.A., Sutunkova M.P., Gurvich V.B.

Literature data collection and processing – Gertan N.A., Kulyashova P.D., Mazhaeva T.V.

Draft manuscript preparation and design – Gertan N.A., Kulyashova P.D.

All co-authors – editing, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all its parts.

Список литературы (п.п. 1-3, 5-51 см. References):

4. Бабич О., Долганюк В., Андреева А., Кацеров Д., Мацкова Л., Ульрих Е., Иванова С., Мишо П., Сухих С. Выделение ценных биологических веществ из культуры микроводорослей. *Еда*. 2022;11(11):1654. <https://doi.org/10.3390/foods11111654>

52. Хвойников А.Н., Сангалова Е.Д., Орлова О.Ю. Тенденции и статистика развития рынка микроводорослей. *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2021; 2(4): 278-282. <https://doi.org/10.17513/vaael.1678>

53. Рынок микроводорослей. ID отчета: 423570. 2025. Verified Market Reports. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/microalgal-powder-market/> Дата обращения: 04.05.2026.

54. Водорослевая индустрия России: перспективы развития и отраслевой потенциал. Научно-практическая конференция «Водорослевая индустрия России: перспективы развития и отраслевой потенциал». ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» 2026. URL: <https://ion.ru/news/vodoroslevaya-industriya-rossii-perspektivy-razvitiya-i-otraslevoy-potentsial/>. Дата обращения: 23.06.2026.

References:

1. Fekete G., Sebők A., Klátyik S., Varga Z.I., Grósz J., Czinkota I., Székács A., Aleksza L. Comparative analysis of laboratory-based and spectroscopic methods used to estimate the algal density of *Chlorella vulgaris*. *Microorganisms*. 2024; 12(6): 1050. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12061050>.

2. Mendes A.R., Spínola M.P., Lordelo M., Prates J.A.M. Assessing the influence of cumulative *Chlorella vulgaris* intake on broiler carcass traits, meat quality and oxidative stability. *Foods*. 2024; 13(17): 2753. <https://doi.org/10.3390/foods13172753>.

3. Wang C.A., Onyeaka H., Miri T., Soltani F. *Chlorella vulgaris* as a food substitute: Applications and benefits in the food industry. *J Food Sci*. 2024; 89(12): 8231-8247. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17529>.

4. Babich O., Dolganyuk V., Andreeva A., Katserov D., Matskova L., Ulrikh E., Ivanova S., Michaud P., Sukhikh S. Isolation of valuable biological substances from microalgae culture. *Foods*. 2022; 11(11): 1654. <https://doi.org/10.3390/foods11111654>.

5. Ricigliano V.A., Cank K.B., Todd D.A., Knowles S.L., Oberlies N.H. Metabolomics-guided

- comparison of pollen and microalgae-based artificial diets in honey bees. *J Agric Food Chem.* 2022; 70(31): 9790-9801. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c02583>.
6. Durdakova M., Kolackova M., Ridoskova A., Cernei N., Pavelicova K., Urbis P., Richtera L., Pelcova P., Adam V., Huska D. Exploring the potential nutritional benefits of *Arthrospira maxima* and *Chlorella vulgaris*: A focus on vitamin B₁₂, amino acids, and micronutrients. *Food Chem.* 2024; 452: 139434. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139434>.
7. Aslanbay Guler B., Demirel Z., Imamoglu E. Induction of antioxidant activities of *Arthrospira platensis* and *Chlorella vulgaris* by modified culture conditions. *Bioprocess Biosyst Eng.* 2024; 47(2): 275-287. <https://doi.org/10.1007/s00449-023-02963-5>.
8. Abdel-Tawwab M., Khalil R.H., Abo Selema T.A.M., Elsamanooudy S.I, El-Werwary S.O.M., Shady S.H.H, Monier M.N., Ismaiel M.M.S. Dietary *Chlorella vulgaris* effectively alleviates oxidative stress, immunosuppression, and enhances the resistance to *Streptococcus agalactiae* infection in cadmium-intoxicated Nile tilapia fingerlings. *Fish Shellfish Immunol.* 2023; 136: 108717. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2023.108717>.
9. Conde T.A., Neves B.F., Couto D., Melo T., Neves B., Costa M., Silva J., Domingues P., Domingues M.R. Microalgae as sustainable bio-factories of healthy lipids: Evaluating fatty acid content and antioxidant activity. *Mar Drugs.* 2021; 19(7): 357. <https://doi.org/10.3390/md19070357>.
10. Panova N., Gerasimova A., Todorova M., Pencheva M., Dincheva I., Batovska D., Gledacheva V., Slavchev V., Stefanova I., Nikolova S., et al. Metabolite signatures and particle size as determinants of anti-inflammatory and gastrointestinal smooth muscle modulation by *Chlorella vulgaris*. *Foods.* 2025; 14(19): 3319. <https://doi.org/10.3390/foods14193319>.
11. Yu M., Chen M., Gui J., Huang S., Liu Y., Shentu H., He J., Fang Z., Wang W., Zhang Y. Preparation of *Chlorella vulgaris* polysaccharides and their antioxidant activity in vitro and in vivo. *Int J Biol Macromol.* 2019; 137: 139-150. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.222>.
12. Prabakaran G., Moovendhan M., Arumugam A., Matharasi A., Dineshkumar R., Sampathkumar P. Evaluation of chemical composition and in vitro antiinflammatory effect of marine microalgae *Chlorella vulgaris*. *Waste Biomass- Valorization* 2018; 10: 3263-3270. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0370-2>.
13. Zhang R., Ge M., Hu M., Zhao Y., Chong B., Li W., Yu J., Lu Y., He S., Wang J., Yue J., Chen H.N., Xu H., Peng Y., Lei P., Liu Z., Dai L. Magnesium deficiency accelerates gut aging and increases susceptibility to colitis. *Aging Cell.* 2026; 25(3): e70446. <https://doi.org/10.1111/accel.70446>.
14. Orhan C., Er B, Deeh P.B.D., Bilgic A.A., Ojalvo S.P., Komorowski J.R., Sahin K.

Different sources of dietary magnesium supplementation reduces oxidative stress by regulation Nrf2 and NF- κ B signaling pathways in high-fat diet rats. *Biol Trace Elem Res.* 2021; 199(11): 4162-4170. <https://doi.org/10.1007/s12011-020-02526-9>.

15. da Silva Lima F., da Rocha Romero A.B., Hastreiter A., Nogueira-Pedro A., Makiyama E., Colli C., Fock R.A. An insight into the role of magnesium in the immunomodulatory properties of mesenchymal stem cells. *J Nutr Biochem.* 2018; 55: 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2018.02.006>.

16. Abdelrahman A.M., Mohammed A.A., Badawy M.M.M., El Bassuony W.I. Orange peels and *Chlorella vulgaris* supplementation ameliorate gamma radiation-induced oxidative stress by regulating TGF- β and NOX2/NOX4 signaling pathways. *Cell Biochem Funct.* 2023; 41(8): 1263-1274. <https://doi.org/10.1002/cbf.3861>.

17. Farage A.E., Abdel-Kareem M.A., Taha M., Abubakr S., Helal N.E., Hendawy M., Elgendy H.A., Elmetwally A.A., Mahfouz H., Baokbah T.A.S., Rabei M.R., Hossain M.A., Helal A.I., Ibrahim M.M.. Protective effect of *Chlorella vulgaris* against experimental hepatic ischemia reperfusion injury downregulating oxidative stress, inflammation, and apoptosis. *Anat Cell Biol.* 2025; 58(3): 460-472. <https://doi.org/10.5115/acb.24.318>.

18. Almutairi L.A., Abdelghaffar E.G., Hafney H.A., Ebaid H.M., Alkhodair S.A., Shaalan A.A.M., EL-Hak H.N.G. Protective impacts of *Chlorella vulgaris* on cisplatin-induced toxicity in liver, kidney, and spleen of rats: Role of oxidative stress, inflammation, and Nrf2 modulation. *Life.* 2025; 15(6): 934. <https://doi.org/10.3390/life15060934>.

19. Mueller J., van Muilekom D.R., Ehlers J., Suhr M., Hornburg S.C., Bang C., Wilkes M., Schultheiß T., Maser E., Rebl A., Goldammer T., Seibel H., Schulz C. Dietary *Chlorella vulgaris* supplementation modulates health, microbiota and the response to oxidative stress of Atlantic salmon. *Sci Rep.* 2024; 14(1): 23674. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72531-8>.

20. Chiu H.F., Lee H.J., Han Y.C., Venkatakrishnan K., Golovinskaia O., Wang C.K. Beneficial effect of *Chlorella pyrenoidosa* drink on healthy subjects: A randomized, placebo-controlled, double-blind, cross-over clinical trial. *J Food Biochem.* 2021; 45(4): e13665. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13665>.

21. Velankanni P., Go S.H., Jin J.B., Park J.S., Park S., Lee S.B., Kwon H.K., Pan C.H., Cha K.H., Lee C.G. *Chlorella vulgaris* modulates gut microbiota and induces regulatory T cells to alleviate colitis in mice. *Nutrients.* 2023; 15(15): 3293. <https://doi.org/10.3390/nu15153293>.

22. Zhang R., Chen J., Mao X., Qi P., Zhang X. Anti-inflammatory and anti-aging evaluation of pigment-protein complex extracted from *Chlorella Pyrenoidosa*. *Mar Drugs.* 2019; 17 (10): 586. <https://doi.org/10.3390/md17100586>.

23. Sibi G., Rabina S. Inhibition of pro-inflammatory mediators and cytokines by *Chlorella*

- vulgaris extracts. Pharmacognosy Res. 2016; 8(2): 118-122. <https://doi.org/10.4103/0974-8490.172660>.
24. Yoon J.H., Do J.S., Velankanni P., Lee C.G., Kwon H.K. Gut microbial metabolites on host immune responses in health and disease. Immune Netw. 2023; 23(1): e6. <https://doi.org/10.4110/in.2023.23.e6>.
25. Makipour A., Hosseinifar S., Khazaeel K., Tabandeh M.R., Jamshidian J. Protective effect of *Chlorella vulgaris* on testicular damage, sperm parameters, androgen production, apoptosis and oxidative stress index in male rats following doxorubicin administration. Reprod Toxicol. 2024; 128:108653. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2024.108653>.
26. Embaby M.A., Haggag E.A., El-Sheikh A.S., Marrez D.A. Biosorption of Uranium from aqueous solution by green microalga *Chlorella sorokiniana*. Environ Sci Pollut Res Int. 2022; 29(38): 58388-58404. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19827-2>.
27. Scasna M., Kucmanova A., Sirotiak M., Blinova L., Soldan M., Hajzler J., Duriska L., Palcut M.. *Chlorella vulgaris*-derived biochars for metribuzin removal: Influence of thermal processing pathways on sorption properties. Materials (Basel). 2025; 18(14): 3374. <https://doi.org/10.3390/ma18143374>.
28. Mungunkhuyag K., Steingroewer J., Walther T., Krujatz F. Isolation and characterization of heavy metal tolerant microalgae from old mining areas of Saxony. Sci Rep. 2026; 16(1): 1337. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-32393-0>.
29. Yadav M., Kumar V., Sandal N., Chauhan M.K. Quantitative evaluation of *Chlorella vulgaris* for removal of toxic metals from body. Journal of Applied Phycology. 2022; 34(6): 2743-2754. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02640-8>.
30. Eissa M.M., Ahmed M.M., Abd Eldaim M.A., Mousa A.A., Elkirdasy A.F., Mohamed M.A., Orabi S.H. *Chlorella vulgaris* ameliorates sodium nitrite-induced hepatotoxicity in rats. Environ Sci Pollut Res Int. 2021; 28(8): 9731-9741. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11474-9>.
31. Arafa S.S., Adel M., Abdelzaher O.F., Alfawaz S.A., Nooreldien N.M., Mohamed R.Y.A., Abd El-Azez A.M., Abd El-Gawwad H.A., El-Sharkawy S.M., Sweed E., Abdelsattar S., El-Dahshan A.A., AbdRabou M.A., Abdelrahman D.S., Atwa A.M., El-Saeed E.I. Demerdash F. Prenatal exposure to the fungicide flutolanil induces developmental and hepatic toxicity in pregnant rats and their fetuses: Insights from in vivo and in silico studies and the protective role of *Chlorella vulgaris*. Reprod Toxicol. 2026; 141: 109203. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2026.109203>.
32. Eissa M.M., Ahmed M.M., Abd Eldaim M.A., Orabi S.H., Elbaz H.T., Mohamed M.A., Elweza A.E., Mousa A.A. Methanolic extract of *Chlorella vulgaris* protects against sodium nitrite-induced reproductive toxicity in male rats. Andrologia. 2020; 52(11): e13811.

<https://doi.org/10.1111/and.13811>.

33. Abdel-Aziem S.H., Abd El-Kader H.A.M., Ibrahim F.M., Sharaf H.A., El Makawy A.I. Evaluation of the alleviative role of *Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis* extract against ovarian dysfunctions induced by monosodium glutamate in mice. *J Genet Eng Biotechnol.* 2018; 16(2): 653-660. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2018.05.001>.
34. Farag M.R., Alagawany M., Mahdy E.A.A., El-Hady E., Abou-Zeid S.M., Mawed S.A., Azzam M.M., Crescenzo G., Abo-Elmaaty A.M.A. Benefits of *Chlorella vulgaris* against cadmium chloride-induced hepatic and renal toxicities via restoring the cellular redox homeostasis and modulating Nrf2 and NF-KB pathways in male rats. *Biomedicines.* 2023; 11(9): 2414. <https://doi.org/10.3390/biomedicines11092414>.
35. Farag M.R., El-Naseery N.I., El Behery E.I., Nouh D.S., El-Mleeh A., Mostafa I.M.A., Alagawany M., Di Cerbo A., Azzam M.M., Mawed S.A. The Role of *Chlorella vulgaris* in attenuating infertility induced by cadmium chloride via suppressing oxidative stress and modulating spermatogenesis and steroidogenesis in male rats. *Biol Trace Elem Res.* 2024; 202(9): 4007-4020. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03971-y>.
36. Giambastiani L., Fiorentino S., Brady K., Raffaelli A., Bramanti E., Lorenzini E.C., Longo V., Sparvoli F., Pozzo L., Vornoli A. Toxicological assessment of *Chlorella vulgaris* and its potential preventive effect in a chronic obstructive pulmonary disease (COPD) mouse model. *Front Toxicol.* 2025; 7: 1654583. <https://doi.org/10.3389/ftox.2025.1654583>.
37. Ilavenil S., Kim D.H., Vijayakumar M., et al. Potential role of marine algae extract on 3T3-L1 cell proliferation and differentiation: An in vitro approach. *Biol Res.* 2016; 49: 38. <https://doi.org/10.1186/s40659-016-0098-z>.
38. Roueintan M., Koohpeyma F., Naseri A., Mahdavi A., Keyghobadi H., Karamibonari A.R., Dastghaib S. Protective effects of *Lactobacillus casei* and *Chlorella vulgaris* on cardiac gene expression (*NF-κB*, *Nrf-2*) and structural alterations in a *C57BL/6* mouse model of MASLD. *J Diabetes Metab Disord.* 2025; 24(2): 259. <https://doi.org/10.1007/s40200-025-01775-6>.
39. Okada H., Yoshida N., Kakuma T., Toyomasu K. Effect of *Chlorella* ingestion on oxidative stress and fatigue symptoms in healthy men. *Kurume Med J.* 2018; 64(4): 83-90. <https://doi.org/10.2739/kurumemedj.MS644001>.
40. Hussein H.J.S., Naji S.S., Al-Khafaji S.M.N. Antibacterial properties of the *Chlorella vulgaris* isolated from polluted water in Iraq. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research.* 2018; 10(10): 2457-2460. URL: <https://cdnx.uobabylon.edu.iq/research/gm27AVcwc0OrZ2hFfviiCw.pdf>
41. Ouzakar S., Skali Senhaji N., Rigano F., Cafarella C., Kounnoun A., Cacciola F., Abrini J. *Chlorella vulgaris* as a producer of lipids for antibacterial, antibiofilm and antifungal

- properties. Nat Prod Res. 2026; 40 (11): 3230-3238. <https://doi.org/10.1080/14786419.2025.2462115>.
42. Sampathkumar S. J., Srivastava P., Ramachandran S. [et al.]. Lutein: A potential antibiofilm and antiquorum sensing molecule from green microalga *Chlorella pyrenoidosa*. Microbial Pathogenesis. 2019; 135: 103658. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2019.103658>.
43. Gumerov T. Y., Freze T.Y., Gabdukaeva L. Z. Ensuring safety during the work with mercury and its inorganic salts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020; 962 (4): 42033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/4/042033>.
44. Uribe-Wandurraga Z.N., Igual M., García-Segovia P., Martínez-Monzó J. Effect of microalgae addition on mineral content, colour and mechanical properties of breadsticks. Food & Function. 2019; 10 (8): 4685-4692. <https://doi.org/10.1039/C9FO00286C>.
45. Tohamy M.M., Ali M.A., Shaaban H.A., Mohamad A.G., Hasanain A.M. Production of functional spreadable processed cheese using *Chlorella vulgaris*. Acta Sci Pol Technol Aliment. 2018; 17(4): 347-358. <https://doi.org/10.17306/J.AFS.0589>.
46. Pehlivan A.D., Yadel İ., Kılıç N., Öztürk H. İ. The incorporation of *Chlorella vulgaris* and *Chondrus crispus* algae in the production of functional ayran drinks: Effects on physicochemical, microbiological, and sensory characteristics. Journal of Food Measurement and Characterization. 2023; 17(3): 3019-3032. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-01840-9>.
47. Iriani D., Putra H.S., Hasan B. [et al.] Diversification of cocoa drinks with *Chlorella vulgaris* hydrolysate as a functional innovation for health benefits. Asian Journal of Dairy and Food Research. 2025. <https://doi.org/10.18805/ajdfr.DRF-488>.
48. Nishimoto Y., Nomaguchi T., Mori Y., Ito M., Nakamura Y., Fujishima M., Murakami S., Yamada T., Fukuda S. The nutritional efficacy of *Chlorella* supplementation depends on the individual gut environment: A randomised control study. Front Nutr. 2021; 8: 648073. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.648073>.
49. Ribeiro D.M., Coelho D., Osório H., Martins C., Bengala Freire J.P., Almeida J., Moreira O., Almeida A.M., Prates J.A.M. Effect of dietary incorporation of *Chlorella vulgaris* and CAZyme supplementation on the hepatic proteome of finishing pigs. J Proteomics. 2022; 256: 104504. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2022.104504>.
50. Lopes P.A., Coelho D, Prates JAM. Testimony on a successful lab protocol to disrupt *Chlorella vulgaris* microalga cell wall. PLoS One. 2022; 17(5): e0268565. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268565>.
51. Coelho D., Ribeiro D., Osório H., de Almeida A.M., Prates J.A.M. Integrated Omics analysis of pig muscle metabolism under the effects of dietary *Chlorella vulgaris* and

exogenous enzymes. *Sci Rep.* 2022; 12(1): 16992. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21466-z>.

52. Khvoynikov A.N., Sangalova E.D., Orlova O.Yu. Trends and statistics of the microalgae market development. *Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava.* 2021; (4-2): 278-282. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/vaael.1678>.

53. Microalgae Market. Report ID: 423570. 2025. Verified Market Reports. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/microalgal-powder-market/> Accessed May 4, 2026. (In Russ.)

54. The Russian Algae Industry: Development Prospects and Industry Potential: Scientific and Practical Conference. Federal Research Center of Nutrition and Biotechnology; 2026. URL: <https://ion.ru/news/vodoroslevaya-industriya-rossii-perspektivy-razvitiya-i-otraslevoy-potentsial/>. Accessed June 23, 2026. (In Russ.)

Информация об авторах

Наталья Александровна Гертан – младший научный сотрудник отдела токсикологии и биопрофилактики ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (620014, г. Екатеринбург, e-mail: gertan00@mail.ru; тел.: 8 (343) 253-11-05, ORCID iD: 0009-0008-3239-5998).

Ильзира Амировна Минигалиева – доктор биологических наук, заведующая отделом токсикологии и биопрофилактики ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (620014, г. Екатеринбург); главный научный сотрудник лаборатории стохастического транспорта наночастиц в живых системах ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (620062, г. Екатеринбург); e-mail: ilzira@ymrc.ru; тел.: 8 (343) 253-12-85. ORCID iD: 0000-0002-0097-7845.

Марина Петровна Сутункова – доктор медицинских наук, директор ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (620014, Екатеринбург); зав. кафедрой гигиены и медицины труда ФГБОУ ВО УГМУ Министерства здравоохранения Российской Федерации, (620028, Екатеринбург), e-mail: sutunkova@ymrc.ru; тел.: 8 (343) 253-12-85. ORCID iD: 0000-0002-1743-7642.

Полина Дмитриевна Куляшова – лаборант-исследователь отдела токсикологии и биопрофилактики ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (620014, г. Екатеринбург, e-mail: pkulyashova@gmail.com; тел.: 8 (343) 253-11-05, ORCID iD: 0009-0004-9184-2779).

Владимир Борисович Гурвич – доктор медицинских наук, научный руководитель ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (620014, Екатеринбург, e-mail: gurvich@ymrc.ru; тел.: 8 (343) 371-12-02, ORCID iD: 0000-0002-6475-7753)

Татьяна Васильевна Мажаева – кандидат медицинских наук, заведующий отделом гигиены питания, качества и безопасности продукции ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (620014, Екатеринбург, e-mail: mazhaeva@ymrc.ru; тел.: 8 (343) 371-13-30, ORCID iD: 0000-0002-8566-2446).

Author Information

Natalia A. Gertan – Junior Researcher, Department of Toxicology and Bioprophylaxis, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg); e-mail: gertan00@mail.ru; tel.: +7 (343) 253-11-05, ORCID iD: 0009-0008-3239-5998.

Ilzira A. Minigalieva – Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Toxicology and Bioprophylaxis, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg); Chief Researcher, Laboratory of Stochastic Transport of Nanoparticles in Living Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620062, Yekaterinburg); e-mail: ilzira@ymrc.ru; tel. +7 (343) 253-12-85; ORCID iD: 0000-0002-0097-7845.

Marina P. Sutunkova – Doctor of Medical Sciences, Director, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg); Head of the Department of Occupational Hygiene and Medicine, Ural State Medical University (620028, Yekaterinburg); e-mail: sutunkova@ymrc.ru; tel. +7 (343) 253-12-85; ORCID iD: 0000-0002-1743-7642.

Polina D. Kulyashova – Laboratory Research Assistant, Department of Toxicology and Bioprophylaxis, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg); e-mail: pkulyashova@gmail.com; tel.: +7 (343) 253-11-05; ORCID iD: 0009-0004-9184-2779.

Vladimir B. Gurvich – Doctor of Medical Sciences, Scientific Director, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg); e-mail: gurvich@ymrc.ru; tel.: +7 (343) 371-12-02; ORCID iD: 0000-0002-6475-7753.

Tatyana V. Mazhaeva – Candidate of Medical Sciences, Head of the Department of Nutrition Hygiene, Food Quality and Safety (620014, Yekaterinburg); e-mail: mazhaeva@ymrc.ru; tel.: +7 (343) 371-13-30; ORCID iD: 0000-0002-8566-2446.

Поступила/Received: 23.06.2026

Принята в печать/Accepted: 14.08.2026

УДК:615.015.3:577.21:546.47

ВЛИЯНИЕ ПЕКТИНА НА ОСНОВЕ ОКСИМЕТИЛУРАЦИЛА НА ЭКСПРЕССИЮ ГЕНА *Zip8* В ТКАНЯХ ПОЧЕК И ПЕЧЕНИ КРЫС ПРИ ХРОНИЧЕСКОЙ КАДМИЕВОЙ ИНТОКСИКАЦИИ

Зиатдинова М.М.¹, Кудояров Э.Р.¹, Хуснутдинова Н.Ю.¹, Ахмадеев А.Р.¹,
Каримов Д.Д.^{1,2}, Гизатуллина А.А.¹, Каримов Д.О.^{1,3}, Зимин Ю.С.², Борисова Н.С.²,
Хакимова И.М.⁴

¹ ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», Уфа, Россия

² ФГБОУ ВО «Уфимский Университет Науки и Технологий», Уфа, Россия

³ ФГБНУ «Национальный НИИ общественного здоровья имени Н.А. Семашко»,
Москва, Россия

⁴ ФГКОУ ВО «Уфимский юридический институт МВД Российской Федерации»,
Уфа, Россия

Кадмий представляет серьёзную угрозу для здоровья человека – его накопление в организме провоцирует токсическое поражение почек, костей и других органов. В связи с широким распространением этого тяжёлого металла в окружающей среде особенно актуальна разработка новых методов профилактики и коррекции кадмиевой интоксикации. Транспортёры *Zip8* могут выступать в роли потенциальных биомаркеров отравления кадмием, что открывает перспективы для ранней диагностики и целенаправленной коррекции нарушений.

Цель. Оценить эффективность пектина на основе оксиметилурацила в коррекции хронической кадмиевой интоксикации на уровнях экспрессии гена транспортёра *Zip8* в тканях почек и печени.

Материалы и методы. Исследование проведено на 60 аутбредных самках крыс (190–220 г, 10–12 недель), разделённых на 5 групп – контрольную (получали дистиллированную воду) и четыре экспериментальные с введением CdCl_2 и пектина на основе ОМУ в течение 3 месяцев с последующей ремиссией. Экспрессию генов *Zip8* оценивали методом ПЦР в реальном времени, статистический анализ выполнен в IBM SPSS Statistics 21.

Результаты. В ходе исследования наблюдались разнонаправленные изменения экспрессии гена *Zip8* в зависимости от вида исследуемой ткани. Введение хлорида кадмия привело к снижению транскрипционной активности гена *Zip8* как в печени,

так и в почках. При этом коррекция пектином на основе ОМУ вызвала неоднозначные сдвиги уровня экспрессии. В печени наблюдалось незначительное повышение, а в почках напротив снижение активности гена *Zip8*. Однако ни одно из выявленных изменений не достигло уровня статистической значимости ($p > 0,05$).

Заключение. Тенденция к повышению экспрессии изучаемого гена в печени указывает на потенциальные гепатопротекторные свойства пектина на основе ОМУ. Устойчивость экспрессии гена *Zip8* в почках может свидетельствовать, что данный транспортёр не является основной мишенью токсического действия кадмия. Однако для полного подтверждения требуются дальнейшие исследования.

Ключевые слова. Кадмий, печень, почки, пектин, оксиметилурацил, экспрессия гена, *Zip8*

Соблюдение этических стандартов. Исследование проведено по протоколу биоэтической комиссии ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека» № 01-1 от 22.01.2025 г., в соответствии с рекомендациями Минздрава РФ, Европейской конвенцией ETS №123 и руководствами ВОЗ. Эвтаназия выполнялась контролируемой подачей CO₂ с последующей декапитацией для забора биоматериала (Приказ Минздрава СССР №755 от 12.08.1977).

Использование инструментов искусственного интеллекта. Авторы заявляют, что при использовании настоящей рукописи системы искусственного интеллекта не применялись.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки

Для цитирования. Зиатдинова М.М., Кудояров Э.Р., Хуснутдинова Н.Ю., Ахмадеев А.Р., Каримов Д.Д., Гизатуллина А.А., Каримов Д.О., Зимин Ю.С., Борисова Н.С., Хакимова И.М. Влияние пектина на основе оксиметилурацила на экспрессию гена *Zip8* в тканях почек и печени крыс при хронической кадмиевой интоксикации. Медицина труда и экология человека. 2026; 3: 305-320.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10316>

Для корреспонденции: Мунира Мунировна Зиятдинова, e-mail: munira.munirovna@yandex.ru

THE EFFECT OF PECTIN BASED ON OMU ON THE EXPRESSION OF THE ZIP8 GENE IN KIDNEY AND LIVER TISSUES OF RATS UNDER CHRONIC CADMIUM INTOXICATION

Ziatdinova M.M.¹, Kudoyarov E.R.¹, Khusnutdinova N.Yu.¹, Akhmadeev A.R.¹,
Karimov D.D.^{1,2}, Gizatullina A.A.¹, Karimov D.O.^{1,3}, Zimin Yu.S.², Borisova N.S.²,
Khakimova I.M.⁴

¹ Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, Russia

² Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

³ The Semashko National Research Institute for Public Health, Moscow, Russia

⁴ Ufa Law Institute of the Russian Ministry of Internal Affairs, Ufa, Russia

Cadmium poses a serious threat to human health – its accumulation in the body provokes toxic damage to kidneys, bones, and other organs. Given the widespread presence of this heavy metal in the environment, the development of new methods for the prevention and correction of cadmium intoxication is particularly relevant. Zip8 transporters may serve as potential biomarkers of cadmium poisoning, opening up prospects for early diagnosis and targeted correction of disorders.

Objective. To evaluate the effectiveness of pectin based on oxymethyluracil in correcting chronic cadmium intoxication at the level of Zip8 gene expression in kidney and liver tissues.

Materials and methods. The study was conducted on 60 outbred female rats (190–220 g, 10–12 weeks), divided into 5 groups: a control group (received distilled water) and four experimental groups with CdCl₂ and pectin based on OMU administered for 3 months, followed by a recovery period. Zip8 gene expression was assessed using real-time PCR; statistical analysis was performed using IBM SPSS Statistics 21.

Results. The study revealed multidirectional changes in Zip8 gene expression depending on the tissue type. Administration of cadmium chloride led to a decrease in transcriptional activity of the Zip8 gene both in the liver and kidneys. Correction with pectin based on OMU caused ambiguous shifts in expression levels: a slight increase was observed in the liver, while a decrease in gene activity was noted in the kidneys. However, none of the observed changes reached statistical significance ($p > 0.05$).

Conclusion. The tendency toward increased expression of the studied gene in the liver indicates the potential hepatoprotective properties of pectin based on OMU. The stability of Zip8 gene expression in the kidneys may suggest that this transporter is not the main target of cadmium's toxic action. However, further research is required to fully confirm these findings.

Keywords. Cadmium, liver, kidneys, pectin, oxymethyluracil, gene expression, Zip8

Compliance with ethical standards. The study was conducted according to the protocol of the Bioethics Commission of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology No. 01-1 dated January 22, 2025, in accordance with the recommendations of the Russian Health Ministry, the European Convention ETS No. 123, and WHO guidelines. Euthanasia was performed by controlled CO₂ inhalation followed by decapitation for biological material collection (Order of the Ministry of Health of the USSR No. 755 dated August 12, 1977).

Declaration of AI use. The authors declare that no artificial intelligence systems were used in preparing this manuscript.

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

Funding. The study had no external funding.

For citation: Ziatdinova M.M., Kudoyarov E.R., Khusnutdinova N.Yu., Akhmadeev A.R., Karimov D.D., Gizatullina A.A., Karimov D.O., Zimin Yu.S., Borisova N.S., Khakimova I.M. The effect of pectin based on OMU on the expression of the Zip8 gene in kidney and liver tissues of rats under chronic cadmium intoxication. Occupational Health and Human Ecology. 2026; 3:305-320.

For correspondence: Munira M. Ziatdinova, e-mail: munira.munirovna@yandex.ru

Загрязнение окружающей среды тяжёлыми металлами представляет одну из наиболее острых экологических и медицинских проблем современности. Промышленное развитие, интенсивное использование агрохимикатов, сжигание ископаемого топлива и неправильная утилизация отходов приводят к накоплению токсичных металлов в почве, воде и воздухе, что создаёт постоянную угрозу для здоровья человека и экосистем [1]. Среди тяжёлых металлов особое место занимает кадмий – высокотоксичный элемент, обладающий кумулятивными свойствами, длительным периодом полувыведения в организме (до 30 лет) и доказанным канцерогенным потенциалом [2].

Кадмий поступает в организм преимущественно ингаляционно (при курении, работе на промышленных предприятиях) и перорально (с загрязнёнными продуктами питания и водой) [3]. После всасывания он транспортируется в кровь, где связывается с альбумином и металлотионеинами, и накапливается в органах-мишенях, прежде всего в почках и печени. Почки являются основным органом накопления кадмия, именно здесь происходит его реабсорбция в проксимальных канальцах, что приводит к развитию тубулярной дисфункции, протеинурии и хронической болезни почек. Печень, как главный детоксикационный орган, также подвергается значительному воздействию кадмия, что проявляется гепатотоксичностью, нарушением метаболических процессов, оксидативным стрессом и прогрессированием до фиброза и некроза при хронической интоксикации [4, 5].

Молекулярные механизмы токсичности кадмия включают индукцию оксидативного стресса, нарушение антиоксидантной защиты, повреждение митохондрий, активацию апоптотических путей и модуляцию экспрессии генов, участвующих в гомеостазе металлов [6].

Одну из ключевых ролей в клеточном поглощении кадмия играет транспортёр Zip8 (SLC39A8) – белок из семейства цинковых транспортёров ZIP (Zrt- и Irt-подобные белки), который опосредует впуск ионов цинка, марганца и кадмия в клетку. Zip8 экспрессируется в почках, печени, лёгких и кишечнике, и его активность напрямую влияет на степень внутриклеточного накопления кадмия и, соответственно, на выраженность токсического эффекта. Понимание роли ZIP8 в патогенезе кадмиевой интоксикации открывает новые возможности для разработки таргетных методов профилактики и коррекции [7, 8].

В связи с широкой распространённостью кадмиевого загрязнения и серьёзностью его последствий для здоровья, поиск эффективных средств профилактики и терапии интоксикации тяжёлыми металлами остаётся высокоактивным направлением исследований. Традиционные хелатирующие агенты, такие как пенницилламин, этилендиаминтетрауксусная кислота (ЭДТА), димеркаптоянтарная кислота, обладают серьёзными побочными эффектами, включая выведение эссенциальных металлов, нефротоксичность и необходимость парентерального введения, что ограничивает их применение. В этой связи особый интерес представляют природные и полусинтетические соединения с детоксикационной активностью, минимальной токсичностью и способностью

избирательно связывать тяжёлые металлы в желудочно-кишечном тракте и тканях [9, 10].

К числу таких сорбентов относятся пектины. Пектины – линейные полисахариды из группы пектиновых веществ, содержащиеся в клеточных стенках растений, они обладают способностью образовывать устойчивые комплексы с ионами тяжёлых металлов за счёт карбоксильных групп галактуроновой кислоты. Однако нативные пектины имеют ограниченную молекулярную массу и низкую биодоступность, что снижает их эффективность при системной интоксикации. Окисление пектина приводит к увеличению количества карбоксильных групп, снижению молекулярной массы и повышению хелатирующей способности, что делает окисленные пектины более активными детоксикантами [11, 12].

Особенно перспективным является пектин на основе оксиметилурацила (ОМУ) – полусинтетическое соединение, полученное модификацией пектина оксиметилурацилом, обладающее самостоятельной антиоксидантной и мембранопротекторной активностью. Комбинированное действие пектиновой матрицы и ОМУ создаёт синергетический эффект, направленный на детоксикацию, защиту органов-мишеней и восстановление нарушенных функций [13, 14, 15].

Несмотря на растущее количество данных о детоксикационной активности пектинов, механизмы их влияния на экспрессию генов транспортёров металлов при хронической кадмиевой интоксикации изучены недостаточно. Особенно актуально исследование влияния различных схем применения пектина на основе ОМУ – параллельно с воздействием кадмия, в восстановительный период или в комбинированном режиме на молекулярные и морфологические показатели поражения почек и печени.

В связи с этим целью настоящего исследования являлось оценка эффективности пектина на основе оксиметилурацила в коррекции хронической кадмиевой интоксикации на уровнях экспрессии гена транспортёра *Zip8* в тканях почек и печени.

Материалы и методы. Исследование выполнено на 60 аутбредных самках крыс весом 190-220 г в возрасте 10-12 недель. Животных по весовому принципу равномерно распределили на 5 групп.

Контрольная группа («К-») в течение 3 месяцев получала эквивалентное количество дистиллированной воды.

Группа «Cd» – перорально водный раствор CdCl_2 (0,1 мг/кг массы тела) ежедневно в течение 3-х месяцев с последующей месячной ремиссией без токсиканта.

Группа «Cd+пектин» – CdCl_2 (0,1 мг/кг) + пектин на основе ОМУ (50 мг/кг) 3 месяца, затем ремиссия без введения веществ.

Группа «Cd+пектин+восстановление» – CdCl_2 (0,1 мг/кг) + пектин (50 мг/кг) 3 месяца, в ремиссию – пектин (50 мг/кг).

Группа «Cd+восстановление» – CdCl_2 (0,1 мг/кг) 3 месяца, в ремиссию – пектин (50 мг/кг).

Пектин вводили через 1 час после CdCl_2 . Раствор CdCl_2 вводили зондом 5 раз в неделю. Эвтаназию проводили через 4 месяца методом декапитации.

Уход, питание и эксперименты соответствовали ГОСТу 33215-2014, рекомендациям ВОЗ, Европейской конвенции по защите животных (ETS №123), Директиве ЕС 2010/63/EU и нормативам Минздрава РФ.

Фрагменты почек и печени сразу после декапитации замораживали в жидком азоте с реагентом ExtractRNA («Евроген»). Тотальную РНК изолировали тризолом по протоколу производителя. Обратную транскрипцию выполняли с MMLV-РНК-полимеразой и олиго-dT праймерами («Евроген», Москва). Экспрессию генов определяли методом ПЦР в реальном времени (Rotor-Gene Q, QIAGEN, Германия) с SYBR Green («Евроген») и специфическими праймерами («Евроген»). Нормализацию проводили по *Gapdh*, относительную экспрессию рассчитывали по $\Delta\Delta\text{Ct}$ [16].

Статистический анализ выполнен в программе IBM SPSS Statistics 21 (IBM Corporation, США). Нормальность распределения проверяли тестом Колмогорова–Смирнова. Межгрупповые различия оценивали однофакторным анализом ANOVA с тестами Тьюки и Тамхейна. Данные представлены как средняя арифметическая и стандартная ошибки ($M \pm m$). Значимыми считались различия $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение. Экспрессия гена *Zip8* в печени демонстрировала разнонаправленные тенденции под влиянием кадмия и пектина на основе ОМУ, однако ни одно из наблюдаемых изменений не достигло уровня статистической значимости.

В группе отрицательного контроля («К-») уровень экспрессии *Zip8* составил $0,00 \pm 0,31$ отн. ед. В группе «Cd» показатель снизился до $-0,44 \pm 0,56$ отн. ед., но

разница с контролем не была значимой ($p=1,000$), что подтверждает отсутствие достоверного подавления экспрессии гена под действием кадмиевой нагрузки в заданных условиях.

Напротив, во всех группах, получавших пектин, наблюдалась тенденция к повышению экспрессии. Наибольшее увеличение отмечено в группе «Cd + пектин» ($1,12 \pm 0,43$ отн. ед.), затем в группе «Cd + восстановление» ($1,03 \pm 0,39$ отн. ед.) и группе «Cd + пектин + восстановление» ($0,77 \pm 0,36$ отн. ед.). Однако ни одно из этих изменений также не оказалось статистически значимым по сравнению с контролем ($p=0,272$, $p=0,494$ и $p=0,865$ соответственно) или между собой. Сравнительная динамика исследуемых групп визуализирована на рисунке 1.

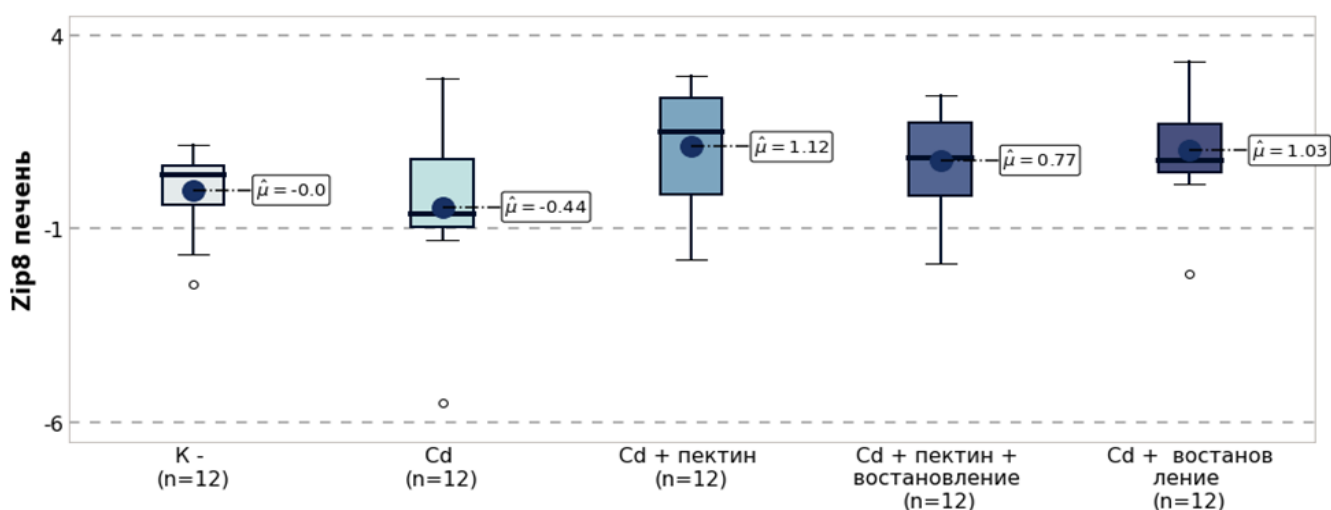


Рисунок 1. Изменение уровня экспрессии гена *Zip8* в печени экспериментальных животных при воздействии кадмия и на фоне коррекции

Figure 1. Change in the level of *Zip8* gene expression in the liver of experimental animals under cadmium exposure and during correction

Экспрессия гена *Zip8* в почечной ткани так же не показала статистически значимых изменений под влиянием экспериментальных воздействий. Уровень экспрессии в контрольной группе («К-») принят за базовый ($0,0 \pm 0,11$ отн.ед.).

В группе «Cd» отмечалось снижение показателя до $-0,49 \pm 0,27$ отн.ед., однако различие с контролем не было достоверным ($p=0,698$). Применение пектина на основе ОМУ по различным схемам также не вызывало значимых изменений («Cd+пектин» ($-0,34 \pm 0,16$; $p=0,749$), «Cd+пектин+восстановление» ($-0,40 \pm 0,20$; $p=0,709$), «Cd+восстановление» ($-0,22 \pm 0,14$; $p=1,000$)).

Межгрупповые сравнения между всеми опытными подгруппами не выявили существенных различий ($p>0,05$). Полученные данные свидетельствуют об устойчивости экспрессии гена *Zip8* в почках к кадмиевой нагрузке и коррекции пектином на основе ОМУ. Визуализация данных представлена на рисунке 2.

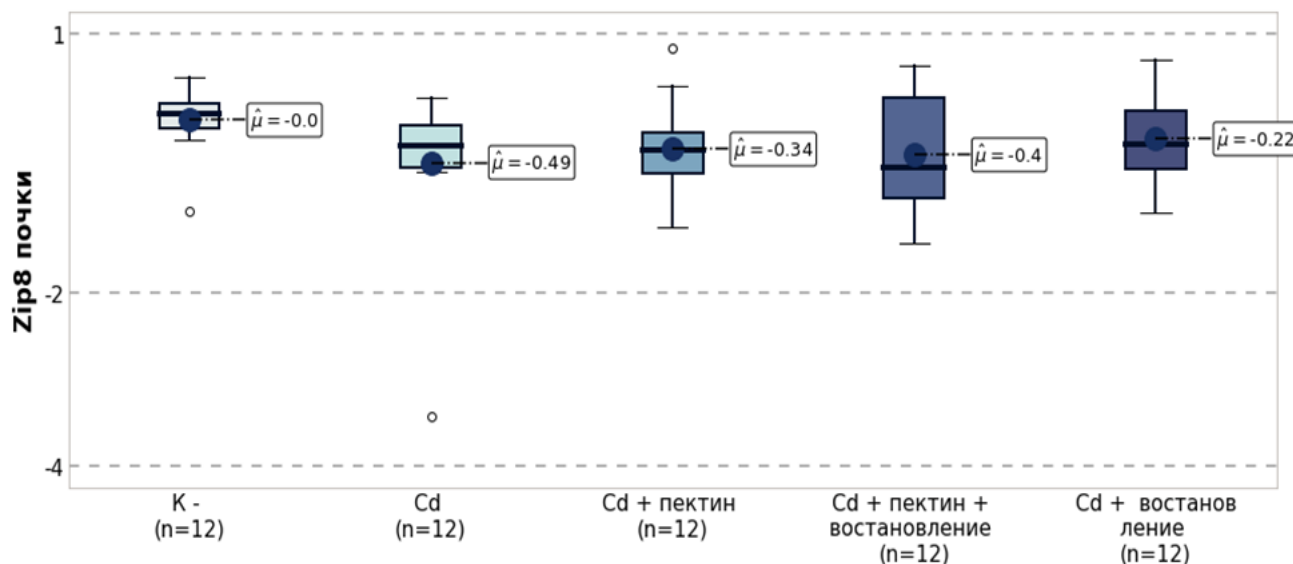


Рисунок 2. Изменение уровня экспрессии гена *Zip8* в почках экспериментальных животных при воздействии кадмия и на фоне коррекции

Figure 2. Change in the level of *Zip8* gene expression in the kidneys of experimental animals under cadmium exposure and during correction

В настоящем исследовании была оценена эффективность пектина на основе ОМУ в коррекции хронической кадмиевой интоксикации на уровне экспрессии гена транспортера *Zip8* в тканях почек и печени крыс. Полученные данные продемонстрировали отсутствие статистически значимых изменений экспрессии гена *Zip8* как в печени, так и в почках.

В печени наблюдались разнонаправленные тенденции экспрессии *Zip8*, что подтверждает отсутствие достоверного подавления активности данного гена под действием кадмиевой нагрузки в заданных условиях эксперимента. Отсутствие значимого влияния кадмия на экспрессию гена *Zip8* в печени согласуется с данными о том, что хроническое поступление кадмия вызывает преимущественно окислительные и метаболические повреждения, а не прямое генетическое подавление транспортных систем [8]. Оксиметилурацил, как производное пуриновых оснований, ранее уже демонстрировал гепатопротекторные свойства на моделях токсического поражения печени тетрахлорметаном, снижая

активность сывороточных ферментов и препятствуя деградации клеточных мембран [17, 18].

Тенденция к повышению экспрессии *Zip8* при применении пектина может отражать компенсаторную реакцию на токсическое воздействие, хотя её недостаточная статистическая мощность указывает на необходимость дальнейшего изучения в этом направлении.

Устойчивость экспрессии гена *Zip8* в почках к кадмиевой нагрузке и коррекции пектином на основе ОМУ может быть объяснена несколькими факторами. Кадмий обладает выраженной нефротоксичностью, однако его механизмы токсического действия преимущественно связаны с окислительным стрессом, нарушением кальциевого гомеостаза и индукцией апоптоза, а не с прямым влиянием на экспрессию металлотранспортёров [19]. Оксиметилурацил и его производные ранее показали антиоксидантную активность и способность восстанавливать функционально-метаболическое состояние почек при токсических повреждениях [20]. Однако в нашем исследовании отсутствие значимых изменений может свидетельствовать об устойчивости почечной ткани к воздействию кадмия в заданных дозах или о том, что *Zip8* не является основным транспортёром, реагирующим на кадмиевую интоксикацию в почках.

Ограничения исследования. Одним из ключевых ограничений данного исследования является ограниченный спектр изучаемых параметров. В работе проанализирована экспрессия лишь одного гена (*Zip8*) в двух тканях (печень и почки), что не позволяет в полной мере оценить глобальные изменения транскриптома в ответ на кадмиевую интоксикацию и коррекцию пектином на основе ОМУ. Кроме того, отсутствие анализа уровней белка *Zip8* и его субклеточной локализации может привести к недооценке функциональной значимости наблюдаемых изменений транскрипции.

Заключение. Результаты настоящего исследования не выявили статистически значимых изменений экспрессии гена *Zip8* в печени и почках на фоне хронической кадмиевой интоксикации и коррекции пектином с оксиметилурацилом. Тем не менее наблюдаемая тенденция к росту экспрессии в печёночной ткани при использовании окисленного пектина дополняет имеющиеся данные о способности производных оксиметилурацила модулировать транспорт металлов и обеспечивать гепатопротекцию. Сохранение стабильной экспрессии *Zip8* в почечной ткани при токсическом воздействии может указывать на то, что данный транспортёр не выступает ключевой мишенью токсического действия кадмия в

почечной ткани. Данные выводы требуют дальнейшего исследования с углублённым анализом сопряжённых молекулярных и биохимических маркеров для подтверждения предполагаемых механизмов гепатопротекции и транспорта металлов.

Список литературы:

1. Das S, Sultana KW, Ndhlala AR, Mondal M, Chandra I. Heavy Metal Pollution in the Environment and Its Impact on Health: Exploring Green Technology for Remediation. *Environ Health Insights*. 2023;17. doi: 10.1177/11786302231201259
2. Rani A, Kumar A, Lal A, Pant M. Cellular mechanisms of cadmium-induced toxicity: a review. *Int J Environ Health Res*. 2014;24(4):378-99. doi: 10.1080/09603123.2013.835032
3. Qu F, Zheng W. Cadmium Exposure: Mechanisms and Pathways of Toxicity and Implications for Human Health. *Toxics*. 2024;12(6):388. doi:10.3390/toxics12060388
4. Nordberg GF, Nordberg M. Metallothionein and Other Factors Influencing Cadmium-Induced Kidney Dysfunction: Review and Commentary. *Biomolecules*. 2025;15(8):1083. doi:10.3390/biom15081083
5. Boonprasert K, Vesey DA, Gobe GC, Ruenweerayut R, Johnson DW, Na-Bangchang K, Satarug S. Is renal tubular cadmium toxicity clinically relevant? *Clin Kidney J*. 2018;11(5):681-687. doi: 10.1093/ckj/sfx153
6. Genchi G, Sinicropi MS, Lauria G, Carocci A, Catalano A. The Effects of Cadmium Toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020; 17(11):3782. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
7. Fujishiro H, Himeno S. New Insights into the Roles of ZIP8, a Cadmium and Manganese Transporter, and Its Relation to Human Diseases. *Biol Pharm Bull*. 2019;42(7):1076-1082. doi:10.1248/bpb.b18-00637
8. Fujishiro H, Okugaki S, Kubota K, Fujiyama T, Miyataka H, Himeno S. The role of ZIP8 down-regulation in cadmium-resistant metallothionein-null cells. *J Appl Toxicol*. 2009;29(4):367-373. DOI: 10.1002/jat.1419
9. Di Dato, Fabiola & Hedera, Peter. Zinc for Wilson's Disease: What We Know and What We Don't Know. *European Medical Journal*. 2024; 84-95. DOI:10.33590/emj/FUM02589.
10. Rajak C, Singh N, Parashar P. Metal toxicity and natural antidotes: prevention is better than cure. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2020;27(35):43582-43598. doi:10.1007/s11356-020-10783-3
11. Mikhalovsky S, Voytko O, Demchenko V, Demchenko P. Enterosorption in the Treatment of Heavy Metal Poisoning. *Chemistry Journal of Moldova*. 2021; 16:9-27. doi:10.19261/cjm.2021.852

12. Würfel H, Geitel K, Qi H, Heinze T. Chemical modification of pectin and polygalacturonic acid: a critical review. *BioResources*. 2021;16(4):8457-8488
13. Мышкин В.А., Бакиров А.Б., Репина Э.Ф., Каримов Д.О., Тимашева Г.В., Хуснутдинова Н.Ю., Смолянкин Д.А. Антиоксидантная активность оксиметилурацила. *Медицина труда и экология человека*. 2015;3:264-273
14. Naqash F, Masoodi FA, Rather SA, Wani SM, Gani A. Emerging concepts in the nutraceutical and functional properties of pectin-A Review. *Carbohydr Polym*. 2017;168:227-239. doi: 10.1016/j.carbpol.2017.03.058
15. Кутлугильдина Г.Г., Зимин Ю.С., Гимадиева А.Р., Каримов Д.О., Хуснутдинова Н.Ю., Репина Э.Ф. Комплексное соединение 5-аминосалициловой кислоты с окисленным пектином, проявляющее противоязвенную активность, и способ его получения. Патент РФ на изобретение RU 2 818 489 C1 от 2024.
16. Livak KJ, Schmittgen TD. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the 2(-Delta Delta C(T)) Method. *Methods*. 2001;25(4):402-8.
17. Репина Э.Ф., Каримов Д.О., Тимашева Г.В., Байгильдин С.С., Хуснутдинова Н.Ю., Кутлина Т.Г., Мухаммадиева Г.Ф., Валова Я.В. Коррекция повреждений печени оксиметилурацилом на ранних сроках после токсического воздействия высоких доз тетрахлорметана. *Медицина труда и экология человека*. 2020; 3:87-100. DOI: <http://dx.doi.org/10.24411/2411-3794-2020-10312>
18. Мышкин В.А., Еникеев Д.А., Срубилин Д.В., Гимадиева А.Р. Экспериментальная оценка производных пиримидина на моделях токсического поражения печени: обзор. *Научное обозрение. Медицинские науки*. 2016;3:88-98.
19. Мышкин В.А., Еникеев Д.А., Срубилин Д.В., Гимадиева А.Р. Способ коррекции токсического поражения печени. Патент РФ на изобретение RU 2 461 894 C1 от 2012
20. Якупова Т.Г., Мухаммадиева Г.Ф., Репина Э.Ф., Хуснутдинова Н.Ю., Каримов Д.О., Смолянкин Д.А., Гарипова З.Р. Транскрипционная активность генов Casp7, Chek1 и Ripk1 в почках крыс при коррекции токсического воздействия акриламида соединениями оксиметилурацила. *Медицина труда и промышленная экология*. 2024;64(5):334-339. DOI: 10.31089/1026-9428-2024-64-5-334-339.

References:

1. Myshkin V.A., Bakirov A.B., Repina E.F., Karimov D.O., Timasheva G.V., Khusnutdinova N.Yu., Smolyankin D.A. Antioxidant activity of oxymethyluracil. *Occupational Health and human ecology*. 2015;3:264-273

2. Kutlugildina G.G., Zimin Yu.S., Gimadieva A.R., Karimov D.O., Khusnutdinova N.Yu., Repina E.F. A complex compound of 5-aminosalicylic acid with oxidized pectin, exhibiting antiulcer activity, and a method for its preparation. RF patent for invention RU 2 818 489 C1 dated 2024.
3. Repina E.F., Karimov D.O., Timasheva G.V., Baygildin S.S., Khusnutdinova N.Yu., Kutlina T.G., Mukhammadiyeva G.F., Valova Ya.V. Correction of liver damage with oxymethyluracil in the early stages after toxic effects of high doses of carbon tetrachloride. Occupational Health and human ecology. 2020; 3:87-100. DOI: <http://dx.doi.org/10.24411/2411-3794-2020-10312>
4. Myshkin V.A., Enikeev D.A., Srubilin D.V., Gimadieva A.R. Experimental evaluation of pyrimidine derivatives on models of toxic liver damage: a review. Scientific review. Medical sciences. 2016;3:88-98
5. Myshkin V.A., Enikeev D.A., Srubilin D.V., Gimadieva A.R. Method of correction of toxic liver damage. RF patent for invention RU 2 461 894 C1 dated 2012
6. Yakupova T.G., Mukhammadiyeva G.F., Repina E.F., Khusnutdinova N.Yu., Karimov D.O., Smolyankin D.A., Garipova Z.R. Transcriptional activity of the Casp7, Chek1, and Ripk1 genes in rat kidneys during correction of toxic effects of acrylamide with oxymethyluracil compounds. Occupational medicine and industrial ecology. 2024;64(5):334-339. DOI: 10.31089/1026-9428-2024-64-5-334-339

Информация об авторах

Зиятдинова Мунира Мунировна, младший научный сотрудник лаборатории генетики отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных ФБУН «Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека», 450106, Уфа, Россия. e-mail: munira.munirovna@yandex.ru

Кудояров Эльдар Ренатович, младший научный сотрудник лаборатории генетики отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных ФБУН «Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека», 450106, Уфа, Россия. e-mail: e.kudoyarov@yandex.ru

Хуснутдинова Надежда Юрьевна, научный сотрудник лаборатории токсикологии отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных

животных ФБУН «Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека», 450106, Уфа, Россия. e-mail: h-n-yu@yandex.ru

Ахмадеев Айдар Ринатович, младший научный сотрудник лаборатории токсикологии отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных ФБУН «Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека», 450106, Уфа, Россия. e-mail: dgaar87@gmail.com

Каримов Денис Дмитриевич, старший научный сотрудник лаборатории генетики отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных ФБУН «Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека», 450106, Уфа, Россия. e-mail: karriden@gmail.com

Гизатуллина Алина Анваровна, младший научный сотрудник лаборатории генетики отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных ФБУН «Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека», 450106, Уфа, Россия. e-mail: alinagisa@yandex.ru

Каримов Денис Олегович, кандидат медицинских наук, заведующий отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных ФБУН «Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека», 450106, Уфа, Россия. e-mail: karimovdo@gmail.com

Зимин Юрий Степанович, доктор химических наук, профессор кафедры физической химии и химической экологии ФГБОУ ВО «Уфимский Университет Науки и Технологий», 450076, Уфа, Россия. e-mail: ZiminYuS@mail.ru

Борисова Наталья Сергеевна, кандидат химических наук, доцент кафедры физической химии и химической экологии ФГБОУ ВО «Уфимский Университет Науки и Технологий», 450076, Уфа, Россия. e-mail: nsguskova@rambler.ru

Хакимова Илина Маратовна, преподаватель кафедры профессиональной подготовки ФГКОУ ВО «Уфимский юридический институт МВД Российской Федерации», 450010, Уфа, Россия. e-mail: Uii.Prof.Podgotovka7@yandex.ru

Author information

Ziatdinova Munira Munirovna, Junior Researcher, Laboratory of Genetics, Department of Toxicology and Genetics with Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa Research

Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, 450106, Russian Federation, e-mail: munira.munirovna@yandex.ru; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1848-7959>.

Kudoyarov Eldar Renatovich, Junior Researcher, Laboratory of Genetics, Department of Toxicology and Genetics with Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, 450106, Russian Federation, e-mail: e.kudoyarov@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2092-1021>.

Khusnutdinova Nadezhda Yur'evna, Researcher, Toxicology Laboratory, Department of Toxicology and Genetics with the Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, 450106, Russian Federation, e-mail: h-n-yu@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5596-8180>

Akhmadeev Aidar Rinatovich, Junior Researcher, Toxicology Laboratory, Department of Toxicology and Genetics with Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, 450106, Russian Federation, e-mail: dgaar87@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7309-4990>.

Karimov Denis Dmitrievich, Senior Researcher, Laboratory of Genetics, Department of Toxicology and Genetics with the Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, 450106, Russian Federation, e-mail: lich-tsar@mail.ru; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1962-2323>

Gizatullina Alina Anvarovna, Junior Researcher, Laboratory of Genetics, Department of Toxicology and Genetics with Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, 450106, Russian Federation, e-mail: alinagisa@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7321-0864>

Karimov Denis Olegovich, PhD, Head of the Department of Toxicology and Genetics with the Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, 450106, Russian Federation; e-mail: karimovdo@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0039-6757>.

Zimin Yuri Stepanovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Department Physical Chemistry and Chemical Ecology, Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450076, Russian Federation, e-mail: ZiminYuS@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3885-041X>.

Borisova Natal'ya Sergeevna, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Department Physical Chemistry and Chemical Ecology, Ufa University of Science and

Technology, Ufa, 450076, Russian Federation, e-mail: nsguskova@rambler.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0692-0883>.

Khakimova Ilna Maratovna, Lecturer in the Department of Professional Training at the Ufa Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Ufa, 450010, Russian Federation, e-mail: Uii.Prof.Podgotovka7@yandex.ru

Поступила/Received: 30.06.2026

Принята в печать/Accepted: 08.09.2026



К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
КАЦНЕЛЬСОНА БОРИСА
АЛЕКСАНДРОВИЧА

Я ПОСВЯТИЛ СЕБЯ НАУКЕ...

Сутункова М.П., Минигалиева И.А., Устюгова Т.С.

ФБУН «Екатеринбургский медицинский – научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора,
Екатеринбург, Россия

20 октября 2026 года исполнилось бы 100 лет со дня рождения *Бориса Александровича Кацнельсона* – доктора медицинских наук, профессора, заслуженного деятеля науки Российской Федерации. Борис Александрович Кацнельсон был широко известен в нашей стране и за рубежом как крупный ученый, занимавшийся исследованием в области промышленной токсикологии. В его научном наследии более 400 научных работ, в числе которых заметное место занимают монографии и методические пособия. Труды Б.А. Кацнельсона и его учеников внесли весомый вклад в изучение этиологии и патогенеза пневмокониозов, а также токсикокинетики и токсикодинамики интоксикаций организма металлами. Серия работ показала, что интенсивность рекрутирования фагоцитирующих клеток в зону отложения пыли определяется цитотоксичностью частиц, а не их массой или числом. На этой основе была создана многокамерная математическая модель кинетики кварцевой пыли в легочной области при

хроническом ингаляционном воздействии – один из первых в отечественной гигиенической токсикологии опытов формального токсикокинетического моделирования. Ключевым теоретическим вкладом Б.А. Кацнельсона в отечественную методологию оценки риска здоровью стала концептуализация оценки риска не как самостоятельной административной процедуры, а как аналитического ядра социально-гигиенического мониторинга.

Существенным вкладом Б.А. Кацнельсона в систему «оценка риска здоровью/социально-гигиенический мониторинг» стала разработка и применение эколого-эпидемиологических методов для верификации расчетных оценок риска на основе наблюдаемых показателей здоровья населения. В серии работ был выполнен анализ зависимостей между загрязнением атмосферного воздуха и смертностью, заболеваемостью, физическим развитием детей. Анализ «временных серий», примененный для оценки острых эффектов загрязнения атмосферного воздуха на смертность населения Екатеринбурга и Нижнего Тагила, выполнялся в том числе в рамках международного консорциума с участием Гарвардской школы общественного здравоохранения и Хельсинкского университета.

Одним из первых в России профессор Б.А. Кацнельсон и его ученики начали исследования в области токсикологии наночастиц. Им обосновано использование в гигиенической оценке для регламентации металлсодержащих наночастиц таких их свойств как размер, химическая природа, растворимость в биологических средах и способность к пенетрации через биологические мембраны. Полученные результаты экспериментальных исследований позволили разработать новый подход к систематизации и обобщению механизмов и путей влияния наночастиц на сердечно-сосудистую систему с целью дальнейшей разработки и внедрения мероприятий по профилактике такого воздействия. Практическим результатом этих исследований являлась разработка гигиенического норматива среднесменной ПДК в воздухе рабочей зоны для дижелеза триоксида (Fe_2O_3) в форме наночастиц, которая составляет $0,4 \text{ мг/м}^3$.

Научным вкладом Б.А. Кацнельсона в развитие оценки комбинированной токсичности химических веществ стали экспериментальные исследования и математическое описание к определению типов комбинированного действия факторов производственной среды. Применение метода поверхности отклика позволило установить, что тип совместного действия двух токсикантов – аддитивность, синергизм, антагонизм – не является фиксированной

характеристикой пары веществ, а зависит от уровня эффекта и дозового соотношения.

Им была предложена новая дефиниция понятия «гормезис», обобщающая различные варианты немоной зависимости доза-ответ, а именно: «Гормезис – это такая зависимость доза-ответ для определенного показателя, которая характеризуется противоположной направленностью ответа в смежных диапазонах уровня воздействия химических веществ, биологических молекул, физических стрессоров или любых других инициаторов ответа». Б.А. Кацнельсон создал концепцию биологической профилактики профессиональных и экологически обусловленных заболеваний – оригинальное научное направление в гигиенической науке, разрабатывавшееся с конца 1970-х годов и которое развивается по сей день. Под его руководством разработаны и апробированы 20 биопрофилактических комплексов, которые внедрены в широкую практику в некоторых городах России. В результате развития этого направления ежегодный предотвращенный экономический ущерб для здоровья населения составляет 9,6 рубля на каждый рубль затрат.

На протяжении длительного времени он являлся экспертом Комиссии по государственному санитарно-эпидемиологическому нормированию при Роспотребнадзоре и Комиссии по канцерогенным факторам при Министерстве здравоохранения Российской Федерации, членом правления Всероссийской общественной организации токсикологов и редколлегии журналов «Токсикологический вестник» и «Вестник уральской медицинской академической науки». За свой многолетний плодотворный труд Борис Александрович был награжден государственными наградами: медалями «За трудовую доблесть», «За трудовое отличие», медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени, Благодарностью Президента Российской Федерации, а также ведомственными и региональными наградами: значками «Отличник здравоохранения», «Отличник санэпидслужбы», нагрудным знаком «Почетный работник Роспотребнадзора», орденом «За заслуги в развитии медицины и здравоохранения», памятной медалью «90 лет Госсанэпидслужбе России», большим числом Почетных грамот и благодарностей, в том числе от Полпреда Президента в Уральском федеральном округе, Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Законодательного собрания Свердловской области и др.



К 80-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
ЛИПАТОВА ГЕОРГИЯ ЯКОВЛЕВИЧА
(1946 – 2023)

Сутункова М.П.¹, Газимова В.Г.¹, Адриановский В.И.¹, Самылкин А.А.^{1,2},
Нарицына Ю.Н.²

¹ ФБУН «Екатеринбургский медицинский – научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора, Екатеринбург, Россия

² ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет» Минздрава России, Екатеринбург

1 сентября 2026 г. исполнилось бы 80 лет доктору медицинских наук, заслуженному работнику высшей школы Российской Федерации Георгию Яковлевичу Липатову. Более полувека своей трудовой деятельности Георгий Яковлевич посвятил сохранению здоровья работающего населения нашей страны. Окончив в 1969 г. санитарный факультет Омского медицинского института, Г.Я. Липатов приступил к работе в качестве санитарного врача по гигиене труда в медсанчасти Уралнефтегазстрой в г. Челябинске. В 1971г. Георгий Яковлевич переходит в городскую санэпидемстанцию г.Челябинска на должность врача по гигиене труда, а затем становится заведующим отдела гигиены труда районной санэпидемстанции Центрального района г. Челябинска. С 1972 по 1973 гг. – врач

по гигиене труда Челябинской Областной санэпидемстанции. С 1973 по 1976 гг. Георгий Яковлевич проходит обучение в аспирантуре на базе Свердловского института гигиены труда и профзаболеваний под руководством академика Б.Т. Величковского. В этот период Г.Я. Липатов проявил незаурядные способности в организации научных исследований, возглавив направление по изучению проблем гигиены труда и окружающей среды в производстве меди и никеля. В 1976 г. защитил диссертацию кандидата медицинских наук на тему «Гигиена труда при электротермическом процессе получения медно-никелевого штейна в производстве никеля». С 1986 г. работает на кафедре гигиены труда Свердловского государственного медицинского института, последовательно занимая должности ассистента и старшего преподавателя, а в 1988 г. заведующим Центральной научно-исследовательской лабораторией (ЦНИЛ). Георгий Яковлевич проводил комплексные гигиенические исследования практически на всех предприятиях медно-никелевой промышленности в России и ближайшем зарубежье. Материалы исследований Г.Я. Липатова были обобщены в докторской диссертации на тему: «Гигиена труда и профилактика профессионального рака в пирометаллургии меди и никеля» 1992 г. В этом же году Георгий Яковлевич становится профессором кафедры коммунальной гигиены с курсом гигиены труда. Оставаясь заведующим ЦНИЛ, в 1993г. Г.Я. Липатов избирается профессором кафедры коммунальной гигиены с курсом гигиены труда, деканом санитарно-гигиенического(в последующем, медико-профилактического) факультета, а с 1995г. заведующим кафедрой гигиены и постдипломной подготовки врачей. Г.Я. Липатов внёс значительный вклад в разработку теории преподавания таких дисциплин, как «Гигиена труда», «Гигиена труда в отраслях промышленности Свердловской области», был автором образовательных программ ординатуры, аспирантуры, дополнительного профессионального образования по специальности 32.05.01 «Науки о здоровье. Профилактическая медицина», автором десяти научно-методических работ и учебного пособия с грифом УМО. За период его руководства факультетом и кафедрой в Уральском государственном медицинском университете (УГМУ) создана система непрерывного образования по специальности «гигиена». Впервые на базе двух общеобразовательных школ сформированы медицинские классы для подготовки выпускников школ к поступлению на медико-профилактический факультет Университета. Организованы курсы усовершенствования врачей гигиенистов и эпидемиологов, на базе которых в 1995 г. приказом Председателя Государственного Комитета санэпиднадзора РФ создан Уральский региональный учебно-методический центр

последипломного образования, подготовивший более 3000 врачей санитарной службы Урала. При научно-методическом руководстве Г.Я. Липатова и его непосредственном участии на базе Федерального бюджетного учреждения науки «Екатеринбургский медицинский-научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора в 2005 г. была создана и до сих пор успешно функционирует лаборатория эпидемиологии и профилактики рака. Лаборатория занимается вопросами канцерогенной опасности предприятий, оценки и управления профессиональными канцерогенными рисками, изучения смертности работающих от злокачественных новообразований, разработки нормативных и методических документов и др. Результаты исследований Г.Я. Липатова нашли широкое практическое применение в виде санитарных правил, методических указаний и информационно-методических писем

Г.Я. Липатов успешно координировал и организовывал работу сотрудников Уральского государственного медицинского университета, Екатеринбургского медицинского-научного центра и специалистов госсанэпидслужбы Свердловской области по санитарно-гигиенической паспортизации канцерогеноопасных производств.

Под его руководством защищено 18 кандидатских и одна докторская диссертация. Опубликовано более 450 научных работ в отечественной и зарубежной печати, 3 монографии. Результаты нашли широкое применение в практике в виде ПДК, санитарных правил, других нормативных документов, патентов на промышленные образцы. Г.Я. Липатов являлся заместителем председателем диссертационного совета по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, членом Комиссии по канцерогенным факторам при Роспотребнадзоре, членом редакционных советов журналов «Гигиенический вестник Урала» и «Вестник Уральской государственной медицинской академии», действительным членом Международной академии наук по экологии, безопасности человека и природы (МАНЭБ). За многолетний добросовестный труд Георгию Яковлевичу присвоено почётное звание «Заслуженный работник Высшей школы Российской Федерации». Г.Я. Липатов награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени и памятной медалью «130 лет Федеральному научному центру гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана», Георгий Яковлевич был удостоен почётной грамоты Государственного комитета санитарно-эпидемиологического надзора, благодарственного письма Главного государственного санитарного врача России, почётной грамоты губернатора

Свердловской области. В 2023 г. Липатову Георгию Яковлевичу было присвоено звание Почетный профессор УГМУ.

Весь жизненный профессиональный путь Георгия Яковлевича Липатова – достойный пример служения науке. Он пользовался заслуженным авторитетом среди студентов и сотрудников Уральского государственного медицинского университета, Екатеринбургского медицинского-научного центра и специалистов госсанэпидслужбы Уральского федерального округа.



ПАМЯТИ
ТРУБЕЦКОВА АЛЕКСЕЯ
ДМИТРИЕВИЧА
(29.06.1964 - 08.06.2026)

Бабанов С. А.

ФГБОУ ВО Самарский государственный медицинский университет
Минздрава России, Самара, Россия

Алексей Дмитриевич Трубецков родился в Саратове в семье учёных, отец Д.И.Трубецков - советский ученый-физик, мать С.В. Трубецкова - преподаватель кафедры физики Саратовского медицинского института. В 1981 году Алексей Дмитриевич закончил среднюю школу №19 г. Саратова. После окончания Саратовского медицинского института (ныне Саратовский государственный медицинский университет имени В.И.Разумовского) в 1987 г. работал лаборантом, ассистентом, доцентом кафедры профпатологии и гематологии этого же института.

Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата медицинских наук по теме «Изменения состояния центральной и периферической гемодинамики у рабочих экспедиционно-вахтовых бригад Западной Сибири и их профилактики» (1991), докторскую диссертацию по теме «Особенности формирования и течения терапевтической патологии при различных формах вахтового и сменного труда» (1999) [3,4]. Научным консультантом по докторской диссертации был заслуженный деятель науки РФ, профессор Осадчук М.А., заведующий кафедрой поликлинической терапии Сеченовского университета (Москва).

В 1996 -2004 годах Алексей Дмитриевич Трубецков заведовал кафедрой профпатологии и гематологии Саратовского государственного медицинского университета имени В.И.Разумовского, Под его руководством проводились исследования патологии при различных формах вахтового и сменного труда,

профессионально обусловленных заболеваний у рабочих различных производств. Под редакцией профессора А.Д. Трубецкого в данный период издано учебное пособие „Профессиональные болезни и гематология“.

Впоследствии А.Д.Трубецков руководил кафедрой терапии Саратовского филиала медицинского университета «Реавиз», а также заведовал лабораторией эргономики и физиологии труда в сельском хозяйстве ФБУН «Саратовский научно-исследовательский институт сельской гигиены» Роспотребнадзора (ныне Саратовский медицинский научный центр гигиены ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Роспотребнадзора), был главным внештатным специалистом - профпатологом Министерства здравоохранения Саратовской области.

Сфера научных интересов Алексея Дмитриевича Трубецкого в области медицины труда – особенности вахтового и сменного труда, «эффект здорового рабочего», особенности заболеваемости и здоровья работников агропромышленного комплекса, проблемы биоэтики [5,6,7,8,9]. Алексей Дмитриевич был соавтором национального руководства «Профессиональная патология» (Москва. «Гэотар-медиа», 2024) [10]. Также его интересовала история изучения профессиональных заболеваний (в его научной библиотеке хранилась часть книг из библиотеки легендарного академика Августа Летавета) [11,12].

Трубецков А.Д. ушёл в расцвете своих творческих сил: работал над новыми проектами, как в области медицины труда, так и в области художественной сферы; над графическими сериями, культурными проектами («Малые передвижники», посткроссинг с авторскими открытками, показ произведений авторов из собственного собрания на городских площадках), готовил к изданию книгу «Художник и город» о Саратове.

Светлая память об Алексее Дмитриевиче навсегда сохранится в наших сердцах.

Список литературы:

1. Микулина, С. Пейзаж N..., или Врачевание искусством : [о художнике и враче А. Д. Трубецкове] / С. Микулина. — Текст : непосредственный // Новые времена. — 2004. — 23-29 июля. — С. 14.
2. Трубецков Алексей Дмитриевич. — Текст : непосредственный // Художники Саратова и Саратовской губернии : биобиблиографический указатель / авторы-составители: И. А. Жукова [и др.]. — Саратов, 2010. — С. 558-560.
3. Трубецков А.Д. Изменения состояния центральной и периферической гемодинамики у рабочих экспедиционно-вахтовых бригад Западной Сибири и их профилактика. Диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук / Саратов, 1991.

4. Трубецков А.Д. «Особенности формирования и течения терапевтической патологии при различных формах вахтового и сменного труда». Диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук / Саратов, 1999.
5. Трубецков А.Д., Жиров К.С. «Эффект здорового рабочего» в различных областях медицины труда (обзор)//Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. 2021. Т. 29. № 2. С. 254-259.
6. Трубецков А.Д. Особенности самоотбора у работниц тепличных хозяйств//Медицина труда и промышленная экология. 2017. № 9. С. 196.
7. Елютина М.Э., Трубецков А.Д., Темаев Т.В. Медико-социальные измерения условий профессиональной деятельности овощеводов защищенного грунта//Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. 2023. Т. 31. № 3. С. 428-434.
8. Темаев Т.В., Суркова И.Ю., Трубецков А.Д., Богомолова Т.А. Субъективная оценка социально-гигиенических факторов профессионального долголетия механизаторов сельского хозяйства//Здоровье населения и среда обитания - ЗНиСО. 2024. Т. 32. № 10. С. 15-25.
9. Трубецков А.Д. Биоэтические подходы к эпидемиологии в медицине труда//Саратов, 2011.
10. Профессиональная патология//Бухтияров И.В., Кузьмина Л.П., Шпагина Л.А., Алексеев В.Б., Амиров Н.Х., Анварул Н.А., Артемова Л.В., Архипов Е.В., Атьков О.Ю., Бабанов С.А., Безрукавникова Л.М., Бодиенкова Г.М., Большакова В.А., Бомштейн Н.Г., Бурякина Е.А., Бушманов А.Ю., Васильева О.С., Гаврылышена К.В., Гарипова Р.В., Гимаева З.Ф. и др. национальное руководство / (2-е издание, переработанное и дополненное) Москва, «Гэотар-медиа»-2024.-904с.
11. Трубецков А.Д. К вопросу об истории развития знаний о пневмокониозах//Санитарный врач. 2020. № 6. С. 78-83.
12. Трубецков А.Д. К юбилею опубликования на русском языке монографии «Профессиональные болезни работников леса и земли»//Санитарный врач. 2019. № 1. С. 64-69.

Для корреспонденции: Бабанов Сергей Анатольевич, д.м.н., профессор, зав. каф. профессиональных болезней и клинической фармакологии им. Косарева В.В. ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава России, [Sergey A.Babanov, MD, PhD, Professor]; адрес: Россия, 443099, Самара, ул. Чапаевская 89 [address: 89, Chapaevskaya str., 443099, Samara, Russia]; <https://orcid.org/0000-0002-1667-737X>; e-mail: s.a.babanov@mail.ru