Учредитель: Федеральное бюджетное учреждение науки «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека

Адрес учредителя и редакции:
614045, Пермский край, г. Пермь,
ул. Монастырская, д. 82
Тел.: 8 (342) 237-25-34
E-mail: journal@fcrisk.ru
Сайт: http://journal.fcrisk.ru

Редактор и корректор – М.Н. Афанасьева
Технический редактор – М.М. Цинкер,
А.В. Алексеева
Переводчик – Н.В. Дубровская

Все права защищены. Ни одна часть этого издания не может быть занесена в память компьютера либо воспроизведена любым способом без предварительного письменного разрешения издателя.

Выход в свет 30.06.2025.
Формат 60×90/8.
Усл. печ. л. 25,0.
Заказ № 104/2025.
Тираж 125 экз. Цена свободная.

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации средства
массовой информации ПИ № ФС 77-52552
от 21.01.2013

Адрес издателя и типографии:
614990, Пермь, Комсомольский пр., 29,
к. 113, тел. 8 (342) 219-80-33

Отпечатано в Издательстве Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113, тел. 8 (342) 219-80-33)

Журнал распространяется по подписке

Подписной индекс журнала
по каталогу «Пресса России»:
годовая подписка – 04153,
полугодовая подписка – 83927

ISSN (Print) 2308-1155
ISSN (Online) 2308-1163
ISSN (Eng-online) 2542-2308

Номер издаётся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Пермского края

АНАЛИЗ РИСКА ЗДОРОВЬЮ

Научно-практический журнал. Основан в 2013 г.
Выходит 4 раза в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Г.Г. Онищенко – главный редактор, акад. РАН, д.м.н., проф. (г. Москва)

Н.В. Зайцева – заместитель главного редактора, акад. РАН, д.м.н., проф. (г. Пермь)

И.В. Май – ответственный секретарь, д.б.н., проф. (г. Пермь)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

В.Г. Акимкин – акад. РАН, д.м.н., проф. (г. Москва)
А.В. Богомолов – д.т.н., проф. (г. Москва)
В.М. Боев – д.м.н., проф. (г. Оренбург)
И.В. Брагина – д.м.н. (г. Москва)
Р.В. Бузинов – д.м.н. (г. Санкт-Петербург)
И.В. Бухтияров – акад. РАН, д.м.н., проф. (г. Москва)
В.Б. Гурвич – д.м.н. (г. Екатеринбург)
И. Дардынская – д.м.н., проф. (г. Чикаго, США)
М.А. Землянова – д.м.н. (г. Пермь)
У.И. Кенесариев – чл.-корр. АМН Казахстана, д.м.н., проф. (г. Алматы, Казахстан)
С.В. Клейн – д.м.н., проф. РАН (г. Пермь)
Т. Кронберг – д.э.н., д.т.н. (г. Руваслахти, Финляндия)
С.В. Кузьмин – д.м.н., проф. (г. Москва)
В.В. Кутырев – акад. РАН, д.м.н., проф. (г. Саратов)
В.Р. Кучма – чл.-корр. РАН, д.м.н., проф. (г. Москва)
А.-М. Ландтблом – д.м.н., проф. (г. Уппсала, Швеция)
Х.Т. Ли – доц., проф. (г. Ханой, Вьетнам)
А.Г. Малышева – д.б.н., проф. (г. Москва)
А.В. Мельцер – д.м.н., проф. (г. Санкт-Петербург)
О.Ю. Милушкина – чл.-корр. РАН, д.м.н. (г. Москва)
О.В. Митрохин – д.м.н. (г. Москва)
А.Ю. Попова – д.м.н., проф. (г. Москва)
В.Н. Ракитский – акад. РАН, д.м.н., проф. (г. Москва)
Ю.А. Ревазова – д.б.н., проф. (г. Москва)
Ж. Рейс – д.м.н., проф. (г. Страсбург, Франция)
В.С. Репин – д.б.н., проф. (г. Санкт-Петербург)
А.В. Решетников – акад. РАН, д.м.н., д.социол.н., проф. (г. Москва)
П.С. Спенсер – проф. (г. Портланд, США)
С.И. Сычик – к.м.н., доцент (г. Минск, Белоруссия)
А. Тсакалоф – проф. (г. Ларисса, Греция)
В.А. Тутельян – акад. РАН, д.м.н., проф. (г. Москва)
Л.М. Фатхутдинова – д.м.н., проф. (г. Казань)
И.В. Фельдблюм – д.м.н., проф. (г. Пермь)
Х.Х. Хамидулина – д.м.н., проф. (г. Москва)
С.А. Хотимченко – д.м.н., проф. (г. Москва)
П.З. Шур – д.м.н. (г. Пермь)

2

Апрель 2025 июнь

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОФИЛАКТИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА: АКТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА РИСКА ЗДОРОВЬЮ

PREVENTIVE HEALTHCARE: TOPICAL ISSUES OF HEALTH RISK ANALYSIS

Н.В. Зайцева, А.А. Савочкина, М.А. Землянова, Д.В. Горяев, А.Г. Фадеев
МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЕРСОНИФИЦИРОВАННОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ НЕЙРО-НЕЧЕТКОЙ СЕТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ
4
N.V. Zaitseva, A.A. Savochkina, M.A. Zemlyanova, D.V. Goryaev, A.G. Fadeev
METHODOLOGY FOR ASSESSING AND PREDICTING PERSONALIZED OCCUPATIONAL HEALTH RISKS BASED ON ADAPTIVE NEURAL FUZZY NETWORK FOR IMAGE RECOGNITION

ОЦЕНКА РИСКА В ГИГИЕНЕ

RISK ASSESSMENT IN HYGIENE

О.О. Синицына, В.В. Турбинский, М.В. Пушкарева, Н.В. Кузь, М.А. Ширяева, Г.В. Масальцев, В.В. Сафандеев
ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЦИЛИНДРОСПЕРМОПСИНА В ВОДЕ ХОЗЯЙСТВЕННО-ПИТЬЕВОГО И КУЛЬТУРНО-БЫТОВОГО ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ РИСКА ЗДОРОВЬЮ НАСЕЛЕНИЯ
16
O.O. Sinitsyna, V.V. Turbinsky, M.V. Pushkareva, N.V. Kuz, M.A. Shiryaeva, G.V. Masaltsev, V.V. Safandeev
SUBSTANTIATING THE MAXIMUM PERMISSIBLE CONCENTRATION OF CYLINDROSPERMOPSIN IN WATER FOR DRINKING AND HOUSEHOLD USE TO MINIMIZE HUMAN HEALTH RISKS

М.Р. Максименко
РИСКИ СМЕРТИ, СВЯЗАННЫЕ С ТЕМПЕРАТУРАМИ: ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ В РЕГИОНАХ РОССИИ В 2004–2019 ГГ.
30
M.R. Maksimenko
TEMPERATURE-RELATED MORTALITY RISKS: EFFECTS OF DIFFERENT SOURCES OF CLIMATIC DATA IN THE RF REGIONS IN 2004–2019

В.И. Горный, С.Г. Крицук, И.Ш. Латыпов, А.А. Тронин, Р.В. Бузинов, С.Н. Носков, Г.В. Еремин, Д.С. Борисова
СПУТНИКОВОЕ КАРТИРОВАНИЕ РИСКА ПРЕЖДЕВРЕМЕННОЙ СМЕРТНОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ, ВЫЗВАННЫХ ПЕРЕГРЕВОМ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ В РОССИЙСКИХ МЕГАЛОПОЛИСАХ
46
V.I. Gornyy, S.G. Kritsuk, I.Sh. Latypov, A.A. Tronin, R.V. Buzinov, S.N. Noskov, G.B. Yeremin, D.S. Borisova
ASSESSING ECONOMIC LOSSES FROM RISKS OF HEAT-RELATED PREMATURE MORTALITY USING SATELLITE MAPPING IN RUSSIAN MEGACITIES

С.С. Гордеева, С.Ю. Шарыпова, А.С. Шляпина
ФАКТОРЫ САМОСОХРАНИТЕЛЬНОГО И РИСКОГЕННОГО ПОВЕДЕНИЯ ТРУДОСПОСОБНОГО НАСЕЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО МЕГАПОЛИСА
60
S.S. Gordeeva, S.Yu. Sharypova, A.S. Shlyapina
FACTORS OF SELF-PRESERVATION AND RISKY BEHAVIOR OF EMPLOYABLE POPULATION IN AN INDUSTRIAL MEGALOPOLIS

Л.В. Кириченко, М.В. Киланова, М.В. Глухих
ФАКТОРЫ И СТРАТЕГИИ СНИЖЕНИЯ РИСКА ЗДОРОВЬЮ ИНОСТРАННЫХ СТУДЕНТОВ ПРИ ОБУЧЕНИИ В РОССИЙСКИХ ВУЗАХ
73
L.V. Kirichenko, M.V. Kilanova, M.V. Glukhikh
FACTORS AND STRATEGIES FOR REDUCING HEALTH RISKS FOR FOREIGN STUDENTS ATTENDING RUSSIAN UNIVERSITIES

ОЦЕНКА РИСКА В ЭПИДЕМИОЛОГИИ

HEALTH RISK ANALYSIS IN EPIDEMIOLOGY

Г.М. Трухина, Г.Г. Бадамшина, Е.А. Попцова, М.А. Ярославцева, Е.С. Волостнова, Э.Р. Гузаирова
КОНТАМИНАЦИЯ ВИРУСАМИ ВОДЫ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ КАК ФАКТОР РИСКА ЗДОРОВЬЮ: ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
87
G.M. Trukhina, G.G. Badamshina, E.A. Poptsova, M.A. Yaroslavtseva, E.S. Volostnova, E.R. Guzairova
VIRUS CONTAMINATION OF CENTRALIZED WATER SUPPLY SYSTEMS AS A HEALTH RISK FACTOR: FEATURES OF LONG-TERM DYNAMICS IN THE RUSSIAN FEDERATION

Пхам Нгок Ха, Нинх Тхи Нанх, Ву Кханх Ван, Тран Ле Минх, Нгуен Тханх Трунг
ВЫДЕЛЕНИЕ И ОПИСАНИЕ ШТАММОВ BACILLUS CEREUS КАК ФАКТОРОВ РИСКА ПИЩЕВЫХ ОТРАВЛЕНИЙ ПИЦЦЕЙ С ГОВЯДИНОЙ (ХАНОЙ, ВЬЕТНАМ)
98
Pham Ngoc Ha, Ninh Thi Hanh, Vu Khanh Van, Tran Le Minh, Nguyen Thanh Trung
ISOLATION AND CHARACTERIZATION OF BACILLUS CEREUS STRAINS ISOLATED FROM A BEEF PIZZA FOOD POISONING INCIDENT IN HANOI

С.В. Балахонов, Е.С. Куликалова, А.И. Мищенко, В.М. Корзун, А.В. Рогалева, С.М. Лященко, А.А. Иташев, С.Л. Сарикова, Н.Б. Калыбаева, Н.М. Мадинова
САНИТАРНО-ПРОСВЕТИТЕЛЬСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД НЕСПЕЦИФИЧЕСКОЙ ПРОФИЛАКТИКИ РИСКОВ ЗАРАЖЕНИЯ ЧУМОЙ НА ТЕРРИТОРИИ ПРИРОДНОГО ОЧАГА В КОШ-АГАЧСКОМ РАЙОНЕ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ **107**

S.V. Balakhonov, E.S. Kulikova, A.I. Mishchenko, V.M. Korzun, A.V. Rogaleva, S.M. Lyashenko, A.A. Itashev, S.L. Sarikova, N.B. Kalybayeva
SANITARY-EDUCATIONAL ACTIVITIES AS AN EFFECTIVE METHOD OF NONSPECIFIC PLAGUE PREVENTION IN THE NATURAL PLAGUE FOCUS IN THE KOSH-AGACH DISTRICT OF THE REPUBLIC OF ALTAI

МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ РИСКА

MEDICAL AND BIOLOGICAL ASPECTS RELATED TO ASSESSMENT OF IMPACTS EXERTED BY RISK FACTORS

М.П. Сутункова, И.А. Минигалиева, В.Г. Панов, Т.В. Махорина, М.С. Унесихина, И.Г. Шеломенцев, Р.Р. Сахаутдинова
К ОЦЕНКЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО РИСКА ДОЗОЗАВИСИМЫХ ЭФФЕКТОВ ГЕПАТОТОКСИЧНОСТИ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА СЕЛЕНА **114**

M.P. Sutunkova, I.A. Minigalieva, V.G. Panov, T.V. Makhorina, M.S. Unesikhina, I.G. Shelomentsev, R.R. Sakhautdinova
ON ASSESSING THE POTENTIAL RISK OF DOSE-DEPENDENT HEPATOTOXIC EFFECTS OF SELENIUM OXIDE NANOPARTICLES

Н.В. Зайцева, С.Л. Валина, О.Ю. Устинова, И.Е. Штина, О.А. Маклакова
ОБЩИЕ ИММУНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ МОДИФИКАЦИИ У ДЕТЕЙ ПРОТИВОИНФЕКЦИОННОГО ИММУНИТЕТА И АЛЛЕРГИЧЕСКОЙ РЕАКТИВНОСТИ, АССОЦИИРОВАННЫЕ С ОСОБЕННОСТЯМИ СОВРЕМЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА И КАЧЕСТВОМ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ **126**

N.V. Zaitseva, S.L. Valina, O.Yu. Ustinova, I.E. Shtina, O.A. Maklakova
COMMON IMMUNOLOGICAL PATHWAYS OF ANTI-INFECTION IMMUNITY AND ALLERGIC REACTIVITY MODIFICATION IN CHILDREN ASSOCIATED WITH PECULIARITIES OF THE MODERN EDUCATIONAL PROCESS AND ENVIRONMENT QUALITY

ОЦЕНКА РИСКА В ОРГАНИЗАЦИИ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

RISK ASSESSMENT IN PUBLIC HEALTHCARE

Е.А. Гутич, С.Л. Итпаева-Людчик, Е.А. Николаева, И.В. Мадекша
ОЦЕНКА ОТНОСИТЕЛЬНОГО РИСКА ДИСКОМФОРТА И ЕГО СУБЪЕКТИВНОЕ ВОСПРИЯТИЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ: РАЗЛИЧИЯ В АДАПТАЦИИ ПЕРСОНАЛА ИНФЕКЦИОННЫХ И МНОГОПРОФИЛЬНЫХ СТАЦИОНАРОВ ВО ВРЕМЯ ПАНДЕМИИ COVID-19 **145**

K.A. Hutsich, S.L. Itpayeva-Liudchyk, K.A. Nikalayeva, I.V. Madeksha
ASSESSMENT OF RELATIVE RISK OF DISCOMFORT AND ITS SUBJECTIVE PERCEPTION ASSOCIATED WITH PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT: ADAPTATION DIFFERENCES AMONG STAFF IN INFECTIOUS DISEASE AND MULTIDISCIPLINARY HOSPITALS DURING THE COVID-19 PANDEMIC

А.Б.Зудин, М.А.Кузнецова,Т.П. Васильева
УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ НИЗКОЙ УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ РАБОТОЙ И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ВЫГОРАНИЯ ВРАЧЕЙ ОБЩЕЙ ПРАКТИКИ **155**

A.B. Zudin, M.A. Kuznetsova, T.P. Vasilyeva
MANAGING THE RISK OF LOW JOB SATISFACTION AND PROFESSIONAL BURNOUT OF GENERAL PRACTITIONERS

Г.В. Жукова, П.А. Мартыщук, Е.Р. Афер, А.Н. Шуваев, Н.А. Розанова, Д.В. Сергеев, В.А. Кратасюк
МЕТОД RANDOM FOREST В ЗАДАЧАХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА СЛЮНЫ ПРИ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКЕ **166**

G.V. Zhukova, P.A. Martyshuk, E.R. Afer, A.N. Shuvaev, N.A. Rozanova, D.V. Sergeev, V.A. Kratasyuk
RANDOM FOREST METHOD FOR INTERPRETING RESULTS OBTAINED BY BIOLUMINESCENCE ANALYSIS OF SALIVA IN PERSONALIZED DIAGNOSTICS

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОБЗОРЫ

ANALYTICAL REVIEWS

Н.И. Хорсева, П.Е. Григорьев
СИСТЕМНЫЕ ЭФФЕКТЫ РАДИОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ (ОБЗОР). ЧАСТЬ 1. ЖЕЛЕЗЫ СЕКРЕЦИИ **175**

N.I. Khorseva, P.E. Grigoriev
SYSTEMIC EFFECTS OF RADIOFREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS (REVIEW). PART 1. SECRETION GLANDS

Н.А. Гертан, М.П. Сутункова, Л.В. Шабардина, Т.В. Махорина, К.М. Никогосян, Р.Ф. Минигалиева
СОВРЕМЕННЫЕ ДАННЫЕ О ПУЛЬМОНО-, ГЕПАТО- И КАРДИОТОКСИЧНОСТИ НАНОЧАСТИЦ IN VIVO (ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР) **185**

N.A. Gertan, M.P. Sutunkova, L.V. Shabardina, T.V. Makhorina, K.M. Nikogosyan, R.F. Minigalieva
UPDATE ON PULMONO-, HEPATO-, AND CARDIOTOXICITY OF NANOPARTICLES IN VIVO: A LITERATURE REVIEW

НОВЫЕ ЗАКОНОДАТЕЛЬНЫЕ, НОРМАТИВНЫЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ДОКУМЕНТЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В СФЕРЕ АНАЛИЗА РИСКА ЗДОРОВЬЮ **196**

NEW LEGAL, REGULATORY AND METHODOLOGICAL DOCUMENTS ISSUED IN THE RF IN THE SPHERE OF HEALTH RISK ANALYSIS

ПРОФИЛАКТИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА: АКТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА РИСКА ЗДОРОВЬЮ

УДК 613.6.027, 613.644
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.01

Читать онлайн

Научная статья

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЕРСОНИФИЦИРОВАННОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ НЕЙРО-НЕЧЕТКОЙ СЕТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

Н.В. Зайцева[1,2], А.А. Савочкина[3], М.А. Землянова[1,3], Д.В. Горяев[4], А.Г. Фадеев[4]

[1]Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения, Российская Федерация, 614045, г. Пермь, ул. Монастырская, 82
[2]Отделение медицинских наук Российской академии наук, Российская Федерация, 109240, г. Москва, ул. Солянка, 14
[3]Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29
[4]Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Красноярскому краю, Российская Федерация, 660097, г. Красноярск, ул. Каратанова, 21

Здоровьесбережение работников промышленных производств – национальный приоритет, определяющий возможности сохранения профессионального долголетия. В связи с этим необходимость развития и совершенствования научных основ анализа профессиональных рисков здоровью, связанных со сложным воздействием факторов риска производственной среды и трудового процесса, с акцентуацией персонифицированных оценок приобретает особую остроту. Осуществлены разработка и апробация методологии и программного обеспечения оценки и прогнозирования персонифицированного профессионального риска для здоровья на основе адаптивной нейро-нечеткой сети распознавания образов.

Дизайн исследования основан на модели искусственного интеллекта как математической структуры, обученной распознавать закономерности и определять принадлежность объекта анализа по системе критериев к определенной категории профессионального риска. Обучение и валидация сети осуществлены на примере выборки работников подземной добычи медно-никелевых руд с помощью данных об условиях их труда, воздействующих факторах, индивидуальных медико-биологических показателях (всего 175 000 параметров). Объем обучающей выборки составил 80 %, валидирующей – 20 %. Сеть апробирована на независимой выборке данных о работниках на примере основной профессии бурильщик шпуров.

Разработана и программно обеспечена методология, теоретической основой которой является адаптивная нейро-нечеткая сеть распознавания образа, имеющая специальную гибридную многослойную архитектуру, гарантирующую точность прогнозных оценок, минимизацию ошибок. Персонифицированные профессиональные риски для

© Зайцева Н.В., Савочкина А.А., Землянова М.А., Горяев Д.В., Фадеев А.Г., 2025

Зайцева Нина Владимировна – академик РАН, доктор медицинских наук, профессор, научный руководитель (e-mail: znv@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-25-34; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2356-1145).

Савочкина Анна Александровна – старший преподаватель кафедры высшей математики (e-mail: aidas_76@mail.ru; тел.: 8 (342) 239-16-97; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2591-6632).

Землянова Марина Александровна – доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий отделом биохимических и цитогенетических методов диагностики (e-mail: zem@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 236-39-30; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8013-9613).

Горяев Дмитрий Владимирович – кандидат медицинских наук, руководитель, главный государственный санитарный врач по Красноярскому краю (e-mail: office@24.rospotrebnadzor.ru; тел.: 8 (391) 226-89-50; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6450-4599).

Фадеев Алексей Геннадьевич – начальник отдела надзора за условиями труда (e-mail: onut@24.rospotrebnadzor.ru; тел.: 8 (391) 227-66-43; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1712-9196).

здоровья каждого работника валидирующей выборки, обусловленные развитием вибрационной болезни, связанной с одновременным воздействием производственного шума (на 10–40 дБА выше ПДУ) и вибрации общей на уровне 106–113 дБ, относятся к категории «высокие» и «очень высокие». Риски, обусловленные развитием нейросенсорной тугоухости (НСТ), связанной с сочетанным воздействием шума (на 5–30 дБА выше ПДУ) и комплекса химических веществ (в 2,0–2,5 раза выше ПДК$_{рз}$), оцениваются в диапазоне от средних до очень высоких. Прогноз для здоровья работников данной профессии независимой выборки показал, что в структуре ожидаемых профессиональных и профессионально обусловленных заболеваний с риском от низкого до высокого более 75 % обусловлены вибрационной болезнью, 48 % – полинейропатией, 6 % – НСТ, 75 % – дорсопатией, 30 % – гипертонической болезнью. Углубленные исследования состояния здоровья бурильщиков шпуров подтвердили фактическую реализацию прогнозируемых рисков у 87–89 % работников.

Разработанная и апробированная методология является эффективной. Достигнута точность прогнозирования на уровне 89 ± 2 %, тренд ошибки прогноза сводится к минимуму. Существенно расширяется возможность получения быстрого и точного персонифицированного прогноза профессионального риска для здоровья работника. Система применима для работников различных сфер производственной деятельности, реализует переход от контактного исследования к количественному прогнозированию без информационных потерь, что определяет ее тиражируемость и масштабируемость.

Ключевые слова: *производственная среда, трудовой процесс, вредные и опасные факторы, экспозиция, профессиональные риски здоровью, адаптивная нейро-нечеткая сеть, распознавание образа.*

Сбережение и укрепление здоровья работников промышленных производств – национальный приоритет, определяющий возможности сохранения профессионального долголетия в соответствии с темпами социально-экономического развития страны и повышения уровня ее национальной безопасности [1–4]. Достижение данной цели занимает особое место среди приоритетных направлений государственной политики и является важным фактором реализации стратегических интересов Российской Федерации[1], в том числе таких как «…опережающий рост показателей ожидаемой продолжительности здоровой жизни, снижение к 2030 году суммарной продолжительности временной нетрудоспособности граждан в трудоспособном возрасте…».

С учетом расширения периода трудовой активности [1, 4] особую актуальность приобретают вопросы улучшения состояния здоровья работников, снижения заболеваемости неинфекционными болезнями и потерь трудовой активности, связанных со стойкой и временной нетрудоспособностью [5–8]. По данным Федеральной службы государственной статистики, показатель экономически занятого населения в России на начало 2025 г. составил 62,0 % (75,3 млн человек)[2]. При этом условиям труда в структуре факторов, определяющих профессиональные риски для здоровья, уровень и характер связанной с ними заболеваемости, принадлежит важнейшее место[3] [9–11]. Широкая модернизация и автоматизация основных производств ведущих отраслей промышленности, внедрение энергосберегающих технологий и др. способствуют постепенному изменению традиционного характера труда работников ведущих профессий, снижению выраженности неблагоприятных факторов рабочей среды и трудового процесса [12]. Вместе с тем сохраняется достаточно большая доля рабочих мест, не соответствующих санитарно-гигиеническим требованиям к условиям труда[4]. В горнорудном производстве этот показатель достигает 55 %, а при добыче металлических руд – 65 % от общего количества рабочих мест, в обрабатывающей отрасли – 42 %, на транспорте – 39 %, в электроэнергетике – 37 %, в нефтедобывающей отрасли – 30 % [13, 14]. Условия труда в данных отраслях оценены в основном как вредные (от среднего до очень высокого, класс 3.2–3.4) в соответствии с Федеральной государственной системой учета данных специальной оценки условий труда (СОУТ).

Гигиеническими исследованиями показано, что вредность и опасность условий труда работников ведущих отраслей промышленности определяется комплексом неблагоприятных факторов, под воздействием которых находится порядка 47 % от общей численности занятых (на конец 2024 г.)[5]. Из них трудовая деятельность 30,4 % работников сопровождается экспозицией шумовибрационного

---

[1] О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года: Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 г. № 309 [Электронный ресурс] // Президент России. – URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542 (дата обращения: 08.06.2025).

[2] Сколько людей в России работает: статистика трудоспособного населения [Электронный ресурс] // Skypro. – URL: https://sky.pro/wiki/profession/skolko-lyudej-v-rossii-rabotaet-statistika-trudosposobnogo-naseleniya/ (дата обращения: 10.06.2025).

[3] Профессиональная патология: национальное руководство / под ред. академика РАН И.В. Бухтиярова. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2024. – 904 с.

[4] Об утверждении санитарных правил СП 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда»: Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 02.12.2020 г. № 40 [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/573230583 (дата обращения: 10.06.2025).

[5] Удельный вес работников организаций, занятых на работах вредными и (или) опасными условиям труда по видам экономической деятельности на конец 2024 года [Электронный ресурс]. – URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1750065411&tld=ru&lang=ru&name=73631 (5).pdf (дата обращения: 10.06.2025).

фактора, 11,8 % – химических веществ с воздухом рабочей зоны и аэрозолей преимущественно фиброгенного действия (АПФД), 35,2 % – тяжестью и напряженностью трудового процесса [8, 15, 16]. Вредные условия труда формируют значительные профессиональные риски нарушения здоровья и работоспособности, способствуют развитию профессиональных и профессионально обусловленных заболеваний [12], что оказывает существенное влияние на сохранение трудового потенциала и в целом на демографическую ситуацию в стране. По данным Росстата, на начало 2024 г. из общего числа умерших от всех причин смерти лица трудоспособного возраста составили 58 %, в том числе по причине болезней системы кровообращения – 31 %[6]. Отмечаемая убыль числа работников в России, ускоренная нисходящей демографической волной, сопровождается их старением. Это подтверждается прогнозными трендами Института демографии НИУ ВШЭ, показывающими, что с 2022 по 2030 г. численность населения РФ с 20 до 59 лет сократится на 2,6 млн человек, при этом доля работающих в возрасте до 40 лет снизится на 6,6 млн, а от 40 до 59 лет увеличится на 4,0 млн, что может оказать значительное влияние на экономику страны, в том числе на рынок труда [17].

В условиях сокращения трудового потенциала на фоне его количественной трансформации проблема здоровьесбережения трудоспособного населения становится особенно острой [18]. Оценка профессиональных рисков, как один из наиболее современных аналитических инструментов принятия управленческих решений, рассчитана на группы работников, находящихся в одинаковых условиях воздействия производственных факторов, при этом учет особенностей персональной реализации рисков проводится в основном в отношении пола, возраста и стажа [2, 12]. Кроме этого, в большинстве ведущих отраслей промышленности условия труда работников основных профессий характеризуются, как правило, сложной взаимосвязанной системой факторов риска, влияющих друг на друга. Традиционные методы оценки профессиональных рисков, осуществляемых в соответствии с действующим руководством Р 2.2.3969-23[7], не в полной мере учитывают эту сложность, что свидетельствует о необходимости развития и совершенствования существующих методических подходов к его количественной оценке и прогнозированию на персональном уровне [19].

Анализ управленческих решений в области профилактики профессиональных и профессионально обусловленных заболеваний свидетельствует об их определенном ограничительном характере. Сложившаяся практика действий в этом направлении не содержит в полной мере элементов управления профессиональным риском, не удовлетворяет сформировавшимся потребностям раннего выявления донозологических состояний индивидуумов с высокой вероятностью развития профессиональных и / или профессионально обусловленных заболеваний, не ориентирована на последующую разработку и проведение персонализированных медико-профилактических мероприятий [20–22]. Большинство разрабатываемых и реализованных мер, в том числе в виде корпоративных программ сохранения здоровья работников, носят общий рекомендательный характер и ориентированы на работников предприятия в целом [2, 4, 6, 12, 18]. Проводимые периодические медицинские осмотры строго определены действующими нормативно-правовыми актами и направлены на выявление уже состоявшихся клинических форм заболеваний, являющихся медицинскими противопоказаниями к началу и продолжению трудовой деятельности.

В связи с этим для обеспечения стабильных условий, направленных на сохранение и укрепление здоровья работников на рабочих местах, превенции профессиональной и общей соматической патологии, ассоциированной с факторами производственной среды, снижения стойкой и временной утраты профессиональной трудоспособности, необходима разработка и применение инновационных методов и инструментария [9, 10]. Ключевым аспектом мер профилактики заболеваемости, определяющим ее эффективность в конечном счете, является оценка и прогноз профессионального риска для здоровья, базирующиеся на персонифицированном подходе**.** Объективно необходимым является использование современных технологий углубленных исследований индивидуального состояния здоровья, возможностей нейросетевого искусственного интеллекта, позволяющего моделировать сложные зависимости между воздействием вредных факторов производственной среды, индивидуальными параметрами состояния здоровья работников и рисками профессиональных заболеваний. Научные наработки, реализованные в этом направлении, в виде создания концептуальных основ и разработки прогностических цифровых нейросетевых моделей, обученных на ретроспективных или фактических данных об условиях труда, состоянии здоровья, социально-экономических условиях и факторах образа жизни, являются информационно-аналитической основой проведения расчетов и оценки эволюции персональных и групповых (с учетом профессии, возраста, стажа) профессиональных рисков здоровью работ-

---

[6] Женщины и мужчины России. 2024: статистический сборник / А.М. Иванова, А.С. Моруга, С.Ю. Никитина, Л.Н. Фатьянова, В.Ж. Еумарина, М.П. Элефтерова. – М.: Росстат, 2024. – 176 с.

[7] Р 2.2.3969-23. Руководство по оценке профессионального риска для здоровья работников. Организационно-методические основы, принципы и критерии оценки / утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 07.09.2023. – М., 2023. – 77 с.

ников [21]. Этот подход значительно расширил возможности инструментальной базы оценки персонифицированных профессиональных рисков здоровью. Вместе с тем существующая многокомпонентность негативных воздействий и множественность негативных эффектов со стороны здоровья, описываемых качественными и количественными характеристиками, определяют условия нечеткости и неопределенности (нечеткие входные данные) моделируемого процесса. Это требует применения дополнительных методов решений, преодолевающих ограничения, обеспечивающих точное моделирование зависимостей, сценарный анализ для распознавания образов, минимизацию ошибок[8] [23–26].

Вышесказанное свидетельствует о необходимости на основах преемственности дальнейшего развития научно-методических основ персонифицированного прогноза вероятности возникновения прямых и косвенных признаков состояний, патогенетически связанных с воздействием вредных и опасных факторов производственной среды и трудового процесса. Повышение точности персонализированных оценок позволит алгоритмизировать и оптимизировать процесс управления профессиональными рисками здоровью, повысить эффективность мер профилактики, направленных на увеличение профессионального долголетия.

Цель исследования – разработка и апробация методологии и программного обеспечения оценки и прогнозирования персонифицированного профессионального риска для здоровья на основе адаптивной нейро-нечеткой сети распознавания образов.

Материалы и методы. Дизайн исследования основан на модели искусственного интеллекта как математической структуры, обученной распознавать закономерности и определять принадлежность объекта анализа по системе критериев к определенной категории профессионального риска. Реализация программного обеспечения функционирования модели выполнена на языке программирования Python с использованием библиотеки Scikit-fuzzy для создания и вычисления функций принадлежности входных данных. Нейронная сеть, принимающая входные данные, реализована на базе библиотеки высокой производительности и масштабируемости TensorFlow, где происходит обучение, оптимизация весов и параметров функций принадлежности [27–29]. Дефаззификация, выполненная методом центра тяжести (Centroid), реализована на языке Python. На выходе нечеткий результат принимает достаточно четкое значение персонифицированного профессионального риска для здоровья.

При формировании выборки входных данных использовано терм-множество (Т), категорирующее уровни каждого показателя (например, шума, вибрации, химического вещества, физической нагрузки, стажа и др.) следующим образом: Т = {Пренебрежимо малый (ПрМ); Малый (М); Средний (С); Высокий (В); Очень Высокий (ОчВ)}. Терм-множество для каждого показателя ($x_1 \ldots x_n$) имеет вид: ПрМ, М, С, В, ОчВ. На основе полученного количественного результата ($y_р$) оценивали профессиональный риск для здоровья работников. Категорирование значений профессионального риска здоровью работника выполнено в соответствии с общепринятой шкалой на основании определения принадлежности его значения к конкретному диапазону значений шкалы, представленной в табл. 1.

Таблица 1

Шкала диапазонов значений и категорий персонифицированного профессионального риска для здоровья работника

Диапазон значений риска	Категория риска (R) и цвет, соответствующий категории	
$R_1 \in [0; 0{,}25]$	Пренебрежимо малый	
$R_2 \in (0{,}15; 0{,}45]$	Низкий	
$R_3 \in (0{,}35; 0{,}65]$	Средний	
$R_4 \in (0{,}55; 0{,}85]$	Высокий	
$R_5 \in [0{,}75; 1]$	Очень высокий	

Соотнесение значения риска с определенным диапазоном шкалы позволяет уточнить степень этой принадлежности за счет использования множеств с нечеткими границами, «размытыми» на ± 20 %, в результате чего значения соседних диапазонов шкалы могут пересекаться. Если значение риска принадлежит одновременно двум диапазонам шкалы, то принимается более жесткий вариант категории. При соответствии значения персонифицированного профессионального риска категории «низкий» и выше необходимо принятие адекватных регулирующих мер по его минимизации.

Графическая визуализация полученных результатов выполнена с помощью поверхности нечеткого вывода, представляющей собой 3D-график, на котором оси X и Y соответствуют входным данным (например, факторы риска), а ось Z – выходному значению риска после этапа дефаззификации.

Обучение и валидация адаптивной нейро-нечеткой сети выполнены на примере выборки работников подземной добычи медно-никелевых руд с помощью набора детальных данных об условиях их труда, воздействующих факторах, уровнях экспозиции, возрасте, индивидуальных показателях состояния здоровья, в том числе полученных по результатам углубленных обследований (значения биохимических, иммунологических, гематологических, общеклинических, химико-аналитических, функциональных и инструментальных исследований и др., диагнозы заболеваний). Всего 175 000 количе-

[8] Jang J.-S.R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1993. – Vol. 23, № 3. – P. 665–685. DOI: 10.1109/21.256541

ственных и качественных параметров. Объем обучающей выборки составил 80 %, валидирующей выборки – 20 %. Модель обучалась на протяжении 100 эпох. Оценка точности прогноза персонифицированного профессионального риска проведена на основе построения графика точности Accuracy, в котором на горизонтальной оси откладывается количество эпох обучения, а на вертикальной оси – значение точности (accuracy), которое колеблется от 0 до 1 (или от 0 до 100 %, где 1 свидетельствует о 100%-ной точности). Стандартно на графике отображается две линии – одна для оценки точности на обучающей выборке, другая – на валидационной (тестовой). Если обе линии постепенно растут и приближаются к 100 %, то это означает, что модель обучается качественно. Оценка потерь моделью в процессе обучения выполнена на основе построения графика потерь Loss, в котором на горизонтальной оси откладывается количество эпох обучения, а на вертикальной оси – значение функции потерь. Аналогично на графике отображаются две линии, соответствующие потерям на обучающем и на валидационном наборах данных. Чем меньше значение функции потерь, тем выше качество модели.

Результаты и их обсуждение. Для оценки и прогнозирования персонифицированного профессионального риска для здоровья работников разработана методология, теоретической основой которой является адаптивная нейро-нечеткая сеть распознавания образа, обобщения знаний и результирующего вывода, имеющая специальную гибридную многослойную (5 слоев) архитектуру. Принципы прогнозирования сформулированы на основе возможностей сети, сочетающей в себе преимущества комбинации нечетких систем с обучением и структурой нейронных сетей, что обеспечивает точность прогнозных оценок и минимизацию ошибок. Ключевыми аспектами преимуществ являются: адаптивность, реализующая способность к обучению и адаптированию к новым данным, что повышает точность результатов прогноза; нечеткая логика, позволяющая обрабатывать неопределенные и вариативные данные; нейронная компонента, обеспечивающая нелинейную аппроксимацию сложных зависимостей между факторами риска и прогнозируемым показателем (например, вероятностью заболевания) как основы распознавания сложных паттернов (схем-образов); комбинация, объединяющая обработку нечетких данных и возможности аппроксимации нейронных сетей, обучение на данных, отражающих сложные причинно-следственные связи; интерпретируемость результирующего выхода, позволяющая получить представление о факторах, оказывающих наибольшее влияние на оценку риска, что необходимо для принятия адекватных регулирующих мер.

Построение персонифицированной цифровой модели основано на научной концепции расчета профессионального риска для здоровья, реализуемого на базе адаптивной сети нейро-нечеткого распознавания образов. Составные компоненты архитектуры адаптивной нейро-нечеткой сети представлены на рис. 1.

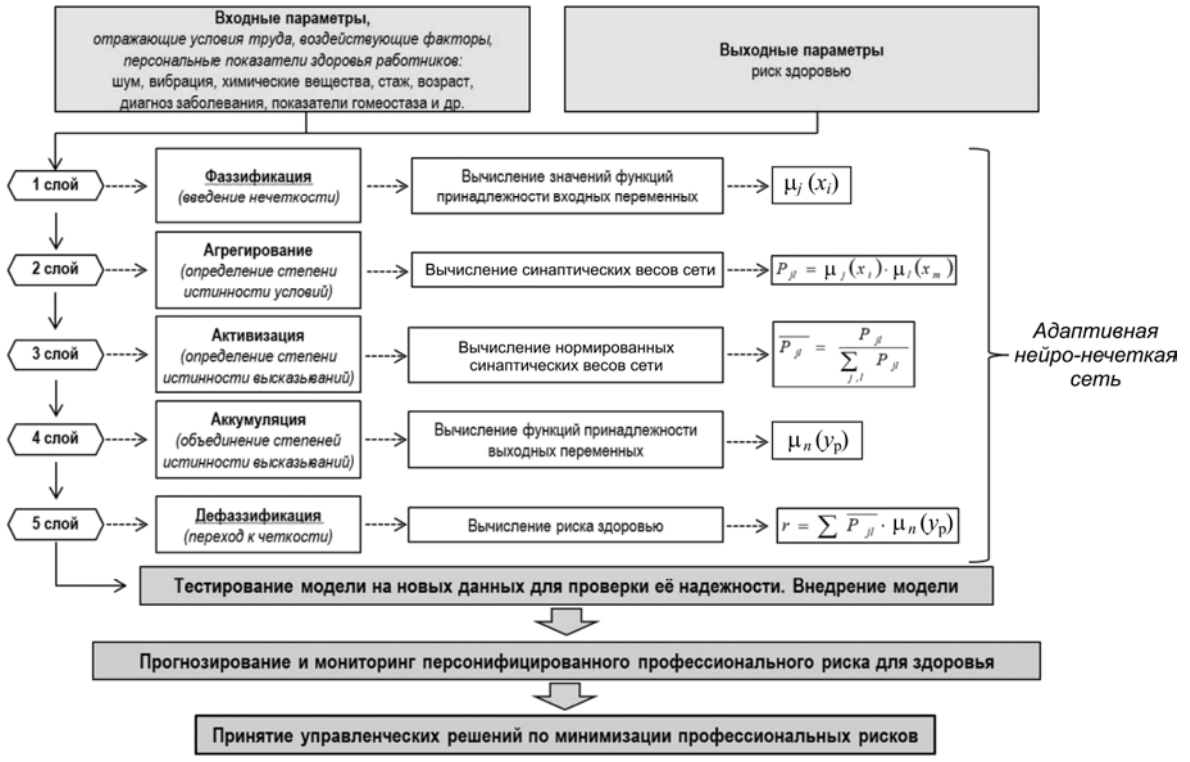


Рис. 1. Многослойная гибридная архитектура (5 слоев) и этапы работы адаптивной нейро-нечеткой сети распознавания образа для прогнозирования персонифицированного профессионального риска для здоровья

Адаптивная нейро-нечеткая сеть распознавания образа включает совокупность последовательно связанных этапов работы:

– сбор и подготовка информационно-аналитической базы данных о фактических условиях труда и воздействующих факторах на рабочих местах, сопряженных с персональными показателями состояния здоровья работников;

– выбор комплекса входных параметров (например, уровень шума, вибрации, концентрация химических веществ в воздухе рабочей зоны, уровень тяжести и напряженности трудового процесса, стаж, возраст, индивидуальные показатели содержания веществ в биосредах, биохимические, гематологические, иммунологические показатели гомеостаза, показатели функций органов и систем, диагноз заболевания, имеющий код в соответствии с МКБ-10, и др.) и выходного результирующего параметра (например, уровня персонифицированного профессионального риска для здоровья работника);

– фаззификация (введение нечеткости) с помощью функций принадлежности входных переменных – первый слой нейронов сети (слой 1) – адаптивный, содержит нейроны, вычисляющие значения функций принадлежности входных переменных: $\mu_j(x_i)$, где $x_i, i=\overline{1,n}$ – входные переменные. Адаптивность слоя достигнута за счет подбора типа функций принадлежности входных данных, определяющего степень принадлежности элемента к определенному множеству. В разработанной системе используются одновременно три функции принадлежности, дополняющие друг друга с учетом своих преимуществ, что существенно повышает точность прогнозирования: гауссова (обеспечивает плавные переходы и точную аппроксимацию), сигмоидальная (реализует плавные *S*-«образные» переходы состояний, и принадлежность переменной изменяется постепенно), трапециевидные (представляют значения с полной принадлежностью на некотором интервале функции принадлежности);

– агрегирование (определение степени истинности условий) с помощью обработки базы нечетких лингвистических правил – второй слой нейронов сети (слой 2) – фиксированный, содержит нейроны, вычисляющие произведения значений функций принадлежности, полученных на первом слое:

$$P_{jl} = \mu_j(x_i) \cdot \mu_l(x_m), \qquad (1)$$

где P_{jl} – синаптические веса сети, $\mu_j(x_i)$, $\mu_l(x_m)$ – значения функций принадлежности;

– активизация (определение степени истинности высказываний) на основе нормализации уровней активации нечетких правил, показывающая, насколько правило релевантно для конкретного фактического набора данных входных значений, выражается числом от 0 до 1, где 0 означает полное несоответствие, 1 – полное соответствие. Эта степень необходима для взвешивания влияния каждого правила при формировании результирующего вывода системы – третий слой нейронов сети (слой 3) – фиксированный, содержит нейроны, вычисляющие нормированные уровни синаптических весов сети:

$$\overline{P_{jl}} = \frac{P_{jl}}{P_{11} + P_{12} \ldots + P_{55}}, \qquad (2)$$

где $\overline{P_{jl}}$ – нормированные синаптические веса сети, P_{jl} – синаптические веса сети;

– аккумуляция (объединение степеней истинности высказываний) с помощью функций принадлежности выходных переменных – четвертый слой нейронов сети (слой 4) – адаптивный, содержит нейроны, вычисляющие значения функций принадлежности выходных переменных, и произведения значений нормированных синаптических весов сети и функций принадлежности выходных переменных:

$$\overline{P_{jl}} \cdot \mu_n(y_p), \qquad (3)$$

где $\overline{P_{jl}}$ – нормированные синаптические веса сети, $\mu_n(y_p)$ – значения функций принадлежности выходных переменных;

– дефаззификация (переход к четкости) с получением четкого значения выходной переменной (y_p) – пятый слой нейронов сети (слой 5) – фиксированный, содержит нейрон, вычисляющий персонифицированный профессиональный риск для здоровья на основе суммы произведений значений функций принадлежности выходных переменных и нормированных синаптических весов:

$$R = \sum\left(\overline{P_{jl}} \cdot \mu_n(y_p)\right), \qquad (4)$$

где R – значение персонифицированного профессионального риска для здоровья;

– тестирование (валидация и верификация) модели на независимом наборе новых входных данных, что обеспечивает проверку ее надежности, обобщающей способности при распознавании образа и адекватности работы на данных, не использованных при обучении;

– внедрение модели для персонифицированного прогнозирования, контроля и мониторинга профессиональных рисков предусматривает процесс использования обученной модели в реальной системе для оценки рисков и последующего наблюдения за их изменениями с течением времени.

Сочетанному воздействию производственного шума, вибрации общей, химических веществ (компоненты медно-никелевой руды, азота оксиды, углерода оксид, кремния диоксид кристаллический при содержании в пыли от 2 до 10 %, проп-2-ен-1-аль, аммиак, углеводороды алифатические предельные С1 – 10 и др. в воздухе рабочей зоны), тяжести и напряженности трудового процесса подвержено до 96 % работников. Длительность экспозиции

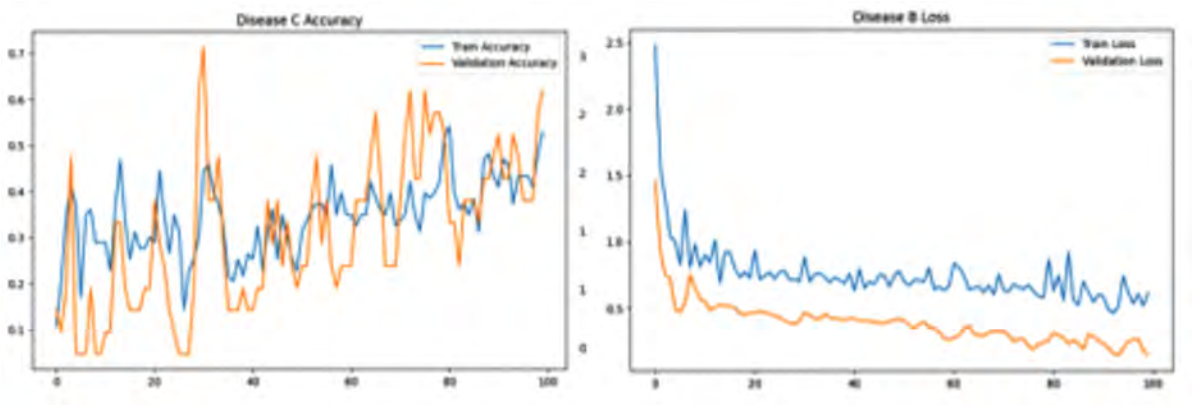


Рис. 2. Графики Accuracy и Loss, характеризующие результаты обучения адаптивной нейро-нечеткой сети

работников составила от 2 до 22 лет при их возрасте от 43 до 63 лет.

Результаты обучения адаптивной нейро-нечеткой сети в виде графиков Accuracy и Loss представлены на рис. 2.

В соответствии с графиком Accuracy показано, что модель запоминает обучающие входные данные и осуществляет персонифицированный прогноз профессионального риска здоровью на обучающей выборке (синяя линия) с точностью до 55 %, на валидационной выборке (оранжевая линия) – с точностью до 72 %.

График Loss показывает, что величина ошибки модели на обучающей выборке имеет постепенный тренд к снижению со временем, на валидационной выборке – более выраженный тренд к снижению, и последующие колебания отмечаются вблизи минимума, что свидетельствует об успешном обучении модели и ее стабильности.

При тестировании сети в результате оценки и прогнозирования группового профессионального риска для здоровья, выполненного для всей валидирующей выборки работников (табл. 2), установлено, например, что одновременное воздействие вибрации и производственного шума формирует наиболее высокие риски, обусловленные развитием вибрационной болезни ($R = 0{,}80$) и дорсопатии ($R = 0{,}67$). Сочетанное воздействие производственной вибрации и химического фактора формирует групповой профессиональный риск ($R = 0{,}35$), обусловленный развитием нейросенсорной тугоухости (НСТ), оцениваемый как «средний».

Установлены персонифицированные профессиональные риски для здоровья каждого работника из валидирующей выборки, которые показали, например, что при экспозиции производственного шума, превышающей ПДУ на 10–40 дБА за рабочую смену, и вибрации общей на уровне 106–113 дБ с учетом всей совокупности биологических и медицинских показателей состояния здоровья и других действующих факторов, индивидуальный риск, обусловленный развитием вибрационной болезни, оценивается как «высокий» (рис. 3). На примере конкретного работника этой выборки показано, что при одновременной экспозиции производственной вибрации общей на уровне 109 дБ и шума (выше ПДУ на 11 дБА) с учетом показателей его состояния здоровья на фоне других действующих факторов персонифицированный риск, обусловленный развитием НСТ, составляет 0,85 и оценивается как «очень высокий» (рис. 3). В другом примере при сочетанном воздействии экспозиции производственного шума (на 5–30 дБА выше ПДУ) и комплекса химических веществ (в 2,0–2,5 раза выше $ПДК_{рз}$) на фоне других действующих факторов индивидуальные риски для здоровья обусловлены развитием НСТ и оцениваются в диапазоне от средних до очень высоких (рис. 4). На примере конкретного работника этой выборки показано, что при одновременной экспозиции производственного шума, превышающего ПДУ на 29 дБ, и химических веществ с воздухом рабочей зоны на уровне в 2,2 раза выше $ПДК_{рз}$ с учетом показателей его состояния здоровья

Таблица 2

Оценка и прогнозирование группового профессионального риска для здоровья всех работников валидационной выборки

Заболевание	Прогнозируемый групповой профессиональный риск для здоровья работников при воздействии различных сочетаний факторов производственной среды и трудового процесса, стажа и др.				
	химические вещества, стаж	шум, стаж	вибрация, стаж	химические вещества, вибрация	вибрация, шум
Вибрационная болезнь	0,09	0,23	0,54	0,72	0,80
Нейросенсорная тугоухость	0,31	0,26	0,03	0,35	–
Дорсопатия	0,03	0,17	0,37	0,41	0,67

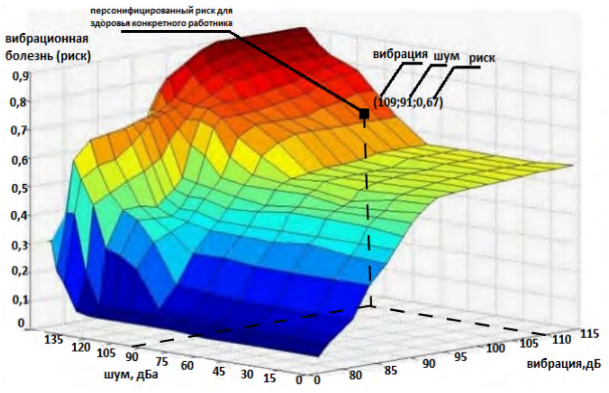


Рис. 3. График, визуализирующий поверхность нечеткого вывода, для оценки персонального профессионального риска для здоровья, обусловленного развитием вибрационной болезни, в зависимости от воздействия производственного шума и стажа на фоне других действующих факторов (точка на поверхности обозначает конкретного работника с персонифицированным риском для здоровья)

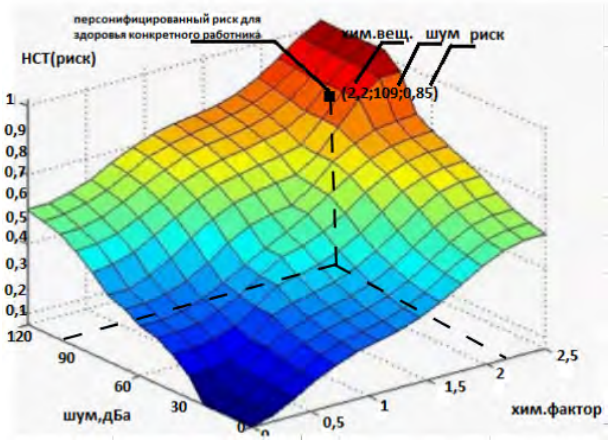


Рис. 4. Графическая визуализация поверхности нечеткого вывода для оценки персонифицированного профессионального риска для здоровья каждого работника, обусловленного развитием НСТ, в зависимости от сочетанного воздействия физического (производственный шум) и химического факторов на фоне других действующих факторов (точка на поверхности обозначает конкретного работника с персонифицированным риском для здоровья)

персонифицированный риск на фоне других действующих факторов, обусловленный развитием НСТ, составляет 0,85 и оценивается как «очень высокий» (рис. 4).

Прогноз персонифицированных профессиональных рисков для здоровья работников независимой выборки (апробация выполнена на примере бурильщиков шпуров), реализованный на основе адаптивной нейро-нечеткой сети, показал, что в структуре ожидаемых профессиональных заболеваний и болезней, связанных с работой, с риском от низкого до высокого более 75 % из них обусловлены вибрационной болезнью, 48 % – полинейропатией, 6 % – НСТ, 75 % – дорсопатией, 30 % – гипертонической болезнью. Углубленные исследования состояния здоровья бурильщиков шпуров подтвердили фактическую реализацию прогнозируемых рисков у 87–89 % работников. Установлены профессиональные заболевания, связанные с одновременным воздействием общей вибрации, производственного шума, тяжести и напряженности труда в виде вибрационной болезни I, II и I–II степени (код по МКБ-10 Т75.2), полинейропатии (G62,8), НСТ (Н90.6). Болезни, связанные с работой, выявлены в виде дорсопатии пояснично-крестцового и шейного отделов позвоночника (М53.8), гипертонической болезни (I11). Этим работникам даны индивидуальные рекомендации по медико-профилактическим мерам, направленным на снижение проявлений негативных последствий, связанных с условиями труда. Территориальные органы Роспотребнадзора информированы о прогнозируемых индивидуальных профессиональных рисках здоровью работников подземной добычи медно-никелевых руд.

Таким образом, разработанная и программно поддержанная методология оценки и прогнозирования персонифицированного профессионального риска для здоровья на основе адаптивной нейронечеткой сети распознавания образов является эффективной, что подтверждено результатами ее апробации на независимой выборке данных. Достигнута точность прогнозирования на уровне 89 ± 2 %, тренд ошибки прогноза сводится к минимуму («плоское дно»). Система, построенная на предложенной методологии, продемонстрировала более точные прогнозы, лучшую интерпретируемость результата, устойчивость к неполным и вариативным данным, ошибкам в них, самостоятельную оптимизируемость параметров по сравнению с упрощенными статистическими методами. Предложенный научно-методический инструментарий на основе распознавания образа существенно расширяет возможности получения быстрого и точного персонифицированного прогноза профессионального риска для здоровья работника. Это обеспечивает принятие адекватных решений в условиях множественности и неопределенности причинно-следственных связей, повышает адресность, персонифицированность и патогенетическую ориентированность превентивных мер, регламентированных действующим законодательством в сфере санитарно-эпидемиологических требований к условиям труда. Система применима для работников различных сфер производственной деятельности, реализует переход от контактного исследования к количественному прогнозированию без информационных потерь, что определяет ее тиражируемость и масштабируемость.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Конфликт интересов. Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Бухтияров И.В. Современное состояние и основные направления сохранения и укрепления здоровья работающего населения России // Медицина труда и промышленная экология. – 2019. – Т. 59, № 9. – С. 527–532. DOI: 10.31089/1026-9428-2019-59-9-527-532

2. Панова Т.В. Здоровье работающего населения – важнейшее условие качества производительности труда // Экономические науки. – 2018. – № 4 (161). – С. 39–41.

3. Чеботарев А.Г., Пфаф В.Ф., Гибадулина И.Ю. Состояние условий труда, профессиональной заболеваемости и совершенствование медико-профилактического обеспечения работников горнодобывающих предприятий // Горная промышленность. – 2021. – № 3. – С. 139–143. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-139-143

4. Мельцер А.В., Ерастова Н.В., Волочкова А.И. Гигиенические аспекты сохранения и укрепления здоровья работающих в корпоративных программах (научный обзор) // Профилактическая и клиническая медицина. – 2024. – № 4 (93). – С. 4–12.

5. Основные организационные вопросы профилактики заболеваемости работающего населения в современных условиях / В.Г. Газимова, В.О. Рузаков, А.С. Шастин, А.А. Федорук, В.Б. Гурвич, Э.Г. Плотко // Медицина труда и промышленная экология. – 2018. – № 11. – С. 32–35. DOI: 10.31089/1026-9428-2018-11-32-35

6. Корпоративные программы профилактики нарушений здоровья у работников вредных предприятий как инструмент управления профессиональным риском / О.Ю. Устинова, Н.В. Зайцева, Е.М. Власова, В.Г. Костарев // Анализ риска здоровью. – 2020. – № 2. – С. 72–82. DOI: 10.21668/health.risk/2020.2.08

7. Жеглова А.В., Яцына И.В., Гаврильченко Д.С. Корпоративные программы сохранения здоровья – основной элемент системы здоровьесбережения работающего населения // Здравоохранение Российской Федерации. – 2022. – Т. 66, № 5. – С. 385–389. DOI: 10.47470/0044-197X-2022-66-5-385-389

8. Профессиональная патология работников различных специальностей при пирометаллургическом рафинировании никеля / А.Н. Никанов, Д.В. Винников, С.А. Сюрин, Е.Д. Шитикова // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. – 2024. – Т. 32, № 5. – С. 66–75. DOI: 10.35627/2219-5238/2024-32-5-66-75

9. Распространенность сердечно-сосудистой патологии у работников алюминиевой промышленности / Н.И. Панев, О.Ю. Коротенко, С.Н. Филимонов, Е.А. Семёнова, Р.Н. Панев // Гигиена и санитария. – 2019. – Т. 98, № 3. – С. 276–279. DOI: 10.18821/0016-9900-2019-98-3-276-279

10. Сюрин С.А., Ковшов А.А. Условия труда и профессиональная патология на предприятиях Чукотского автономного округа // Анализ риска здоровью. – 2020. – № 4. – С. 98–105. DOI: 10.21668/health.risk/2020.4.11

11. Чеботарев А.Г., Семенцова Д.Д. Комплексная оценка условий труда и состояния профессиональной заболеваемости работников горно-металлургических предприятий // Горная промышленность. – 2021. – № 1. – С. 114–119. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-1-114-119

12. Актуальные вопросы улучшения условий труда и сохранения здоровья работников горнорудных предприятий / И.В. Бухтияров, А.Г. Чеботарев, Н.Н. Курьеров, О.В. Сокур // Медицина труда и промышленная экология. – 2019. – Т. 59, № 7. – С. 424–429. DOI: 10.31089/1026-9428-2019-59-7-424-429

13. Шур П.З., Горяев Д.В. Современные корпоративные программы снижения профессионального риска здоровью как средства сохранения трудовых ресурсов [Электронный ресурс] // Гуманизация экономики: благополучие человека и креативный капитал: IX Пермский экономический конгресс. – Пермь, 2025. – URL: https://economcongress.ru/wp-content/uploads/2024/02/5-Шур-Горяев.pdf (дата обращения: 23.05.2025).

14. Титова Е.Я., Голубь С.А. Современные проблемы охраны здоровья работников крупного промышленного предприятия, работающих в условиях профессиональных вредностей // Анализ риска здоровью. – 2017. – № 4. – С. 83–90. DOI: 10.21668/health.risk/2017.4.09

15. Медицина труда работников подземных профессий производства добычи полиметаллических медно-цинковых руд / Э.Р. Шайхлисламова, Л.К. Каримова, А.Д. Волгарева, Н.А. Мулдашева // Санитарный врач. – 2020. – № 5. – С. 9–22. DOI: 10.33920/med-08-2005-01

16. Бухтияров И.В., Чеботарев А.Г., Прохоров В.А. Проблемы оздоровления условий труда, профилактики профессиональных заболеваний работников предприятий горно-металлургического комплекса // Горная промышленность. – 2015. – № 6 (124). – С. 14–17.

17. Денисенко М.Б., Мкртчян Н.В. Демографические изменения и предложение рабочей силы в регионах России // Научный дайджест. – 2022. – № 5 (10). – 10 с.

18. Концевая А.В. Корпоративные программы укрепления здоровья в рамках Национального проекта «Продолжительная и активная жизнь» [Электронный ресурс] // Медицинский компонент корпоративных программ укрепления здоровья на рабочем месте: возможности 2025: симпозиум в рамках XX Всероссийского форума «Здоровье нации – основа процветания России». – Москва, 14–16 мая 2025 г. – URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1750087297&tld (дата обращения: 10.06.2025).

19. Оценка и прогнозирование персонального профессионального риска с уточнением его категорий при помощи вероятностных методов / В.А. Фокин, Н.В. Зайцева, П.З. Шур, С.В. Редько, Е.В. Хрущева // Анализ риска здоровью. – 2021. – № 4. – С. 92–99. DOI: 10.21668/health.risk/2021.4.10

20. Реабилитация работников титано-магниевых производств с установленным заболеванием верхних дыхательных путей / Т.А. Пономарева, А.А. Воробьева, Е.М. Власова, О.Ю. Устинова // Медицина труда и экология человека. – 2019. – № 4 (20). – С. 39–49. DOI: 10.24411/2411-3794-2019-10046

21. Концептуальные основы корпоративной интеллектуальной риск-ориентированной системы анализа, прогноза и профилактики профессиональных и производственно-обусловленных нарушений здоровья работников / Н.В. Зайцева, Д.А. Кирьянов, М.А. Землянова, Д.В. Горяев, О.Ю. Устинова, П.З. Шур // Анализ риска здоровью. – 2023. – № 4. – С. 19–32. DOI: 10.21668/health.risk/2023.4.02

22. Совершенствование механизмов выявления ранних признаков нарушения здоровья для сохранения трудового долголетия / И.В. Бухтияров, Л.П. Кузьмина, Н.И. Измерова, Н.П. Головкова, О.П. Непершина // Медицина труда и промышленная экология. – 2022. – Т. 62, № 6. – С. 377–387. DOI: 10.31089/1026-9428-2022-62-6-377-387

23. Гридина Н.В., Евдокимов И.А., Солодовников В.И. Построение гибридных нейронных сетей с использованием элементов нечеткой логики // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2019. – № 2. – С. 91–97. DOI: 10.14357/20718594190209

24. Тесленко А.Р. Нейро-нечеткие методы в управлении техническими системами и объектами // Язык в сфере профессиональной коммуникации: сборник материалов международной научно-практической конференции преподавателей, аспирантов и студентов. – Екатеринбург: ООО «Издательский Дом «Ажур», 2020. – С. 698–703.

25. Андриевская Н.В., Резников А.С., Черанев А.А. Особенности применения нейро-нечетких моделей для задач синтеза систем автоматического управления // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–7. – С. 1445–1449.

26. Automatic heart disease diagnosis system based on artificial neural network (ANN) and adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS) approaches / M.A.M. Abushariah, A.A.M. Alqudah, O.Y. Adwan, R.M.M. Yousef // Journal of software engineering and applications. – 2014. – Vol. 7, № 12. – P. 1055–1064. DOI: 10.4236/jsea.2014.712093

27. Glushenko S.A. An adaptive neuro-fuzzy inference system for assessment of risks to an organization's information security // Business Informatics. – 2017. – № 1 (39). – P. 68–77. DOI: 10.17323/1998-0663.2017.1.68.77

28. Разработка математической модели распознавания запросов-задач коммуникационных услуг / А.А. Аль-Хашеди, А.А. Обади, Н.К. Нуриев, Е.А. Печеный // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 6. – С. 9–14.

29. Янковская А.Е., Китлер С.В. Принятие решений на основе параллельных алгоритмов тестового распознавания образов // Искусственный интеллект. – 2010. – № 3. – С. 151–152.

Методология оценки и прогнозирования персонифицированного профессионального риска для здоровья на основе адаптивной нейро-нечеткой сети распознавания образов / Н.В. Зайцева, А.А. Савочкина, М.А. Землянова, Д.В. Горяев, А.Г. Фадеев // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 2. – С. 4–15. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.01

UDC 613.6.027, 613.644
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.01.eng

Read online

Research article

METHODOLOGY FOR ASSESSING AND PREDICTING PERSONALIZED OCCUPATIONAL HEALTH RISKS BASED ON ADAPTIVE NEURAL FUZZY NETWORK FOR IMAGE RECOGNITION

N.V. Zaitseva[1,2], A.A. Savochkina[3], M.A. Zemlyanova[1,3], D.V. Goryaev[4], A.G. Fadeev[4]

[1]Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, 82 Monastyrskaya St., Perm, 614045, Russian Federation
[2]Russian Academy of Sciences, Department for Medical Sciences, 14 Solyanka St., Moscow, 109240, Russian Federation
[3]Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolskii Av., Perm, 614990, Russian Federation
[4]Federal Service for Surveillance over Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Krasnoyarsk Regional Office, 21 Karatanova St., Krasnoyarsk, 660097, Russian Federation

Health protection provided for industrial production workers is a national priority, which determines possibilities for preservation of occupational longevity. Given that, it is becoming especially vital to create and develop scientific grounds for analyzing occupational health risks associated with complex exposures to occupational and work-related risk factors with special emphasis placed on personalized estimates. In this study, we aimed to develop and test a methodology and software for assessing and predicting personalized occupational health risks based on an adaptive neural fuzzy network for image recognition.

© Zaitseva N.V., Savochkina A.A., Zemlyanova M.A., Goryaev D.V., Fadeev A.G., 2025

Nina V. Zaitseva – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Scientific Director (e-mail: znv@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-25-34; ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2356-1145).

Anna A. Savochkina – Senior Lecturer at the Higher Mathematics Department (e-mail: aidas_76@mail.ru; tel.: +7 (342) 239-16-97; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2591-6632).

Marina A. Zemlyanova – Doctor of Medical Sciences, Chief Researcher with the duties of the Head of the Department of Biochemical and Cytogenetic Methods of Diagnostics (e-mail: zem@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 236-39-30; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8013-9613).

Dmitrii V. Goryaev – Candidate of Medical Sciences, Head of the Administration, Chief State Sanitary Inspector for the Krasnoyarsk region (e-mail: office@24.rospotrebnadzor.ru; tel.: +7 (391) 226-89-50; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6450-4599).

Aleksei G. Fadeev – Head of the Department for Supervision of Working Conditions (e-mail: onut@24.rospotrebnadzor.ru; tel.: +7 (391) 227-66-43; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1712-9196).

The study design was based on an artificial intellect model as a mathematical structure trained to recognize regularities and establish whether an analyzed object belonged to a specific occupational health risk category per a system of indicators. Network training and validation were performed on an example sample made of workers employed at underground copper-nickel ore mining using data on their working conditions, exposure factors and individual biomedical indicators (175,000 parameters overall). The training sample equaled 80 % and the validating one 20 %. The network was tested on an independent sample of data about workers exemplified by blast-hole drillers as a basic occupation at the mine.

A methodology was developed and provided with relevant software; its theoretical ground was represented by an adaptive neural fuzzy network for image recognition. The network had a specific hybrid multilayer architecture, which ensured accuracy of predictive estimates and error minimization. Personalized occupational health risks for each worker in the validating sample were caused by vibrational disease associated with simultaneous exposure to occupational noise (10–40 dBA higher than MPL) and total vibration equal to 106–113 dB; these risks were ranked as 'high' and 'very high'. Health risks caused by sensorineural hearing loss (SHL) associated with combined exposure to noise (5–30 dBA higher than MPL) and adverse chemicals (2.0–2.5 times higher than single maximum MPC) were estimated as varying from medium to very high. Health prediction for workers of this occupation in the independent sample showed that vibration diseases accounted for 75 % of expected occupational and work-related diseases with risks varying form low to high; polyneuropathy, 48 %; SHL, 6 %; dorsopathy, 75 %; essential hypertension, 30 %. Profound medical examination of blast-hole drillers confirmed that these health risks were actually manifested as diseases in 87–89 % workers.

The developed and tested methodology is quite effective. The prediction accuracy is estimated to reach 89 ± 2 % and the prediction error trend comes to minimum. The methodology provides a considerably wider opportunity to obtain prompt and accurate personalized prediction of health risks for workers. The system is eligible for workers employed at variable productions and implements a transition from contact-based examinations to quantitative prediction without any information losses, which determines its scalability and possibility to replicate it.

Keywords: *occupational environment, work process, adverse and hazardous factors, exposure, occupational health risks, adaptive neural fuzzy network, image recognition.*

References

1. Bukhtiyarov I.V. Current state and main directions of maintaining and strengthening the health of the working population of Russia. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2019, vol. 59, no. 9, pp. 527–532. DOI: 10.31089/1026-9428-2019-59-9-527-532 (in Russian).

2. Panova T.V. Zdorov'e rabotayushchego naseleniya – vazhneishee uslovie kachestva proizvoditel'nosti truda [Health of the working population is the most important condition for quality and labor productivity]. *Ekonomicheskie nauki*, 2018, no. 4 (161), pp. 39–41 (in Russian).

3. Chebotarev A.G., Pfaf V.F., Gibadulina I.Yu. Current State of Labour Conditions, Occupational Morbidity and Improvement of Medical and Preventive Care for Employees of Mining Operations. *Gornaya promyshlennost'*, 2021, no. 3, pp. 139–143. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-139-143 (in Russian).

4. Meltser A.V., Erastova N.V., Volochkova A.I. Hygienic aspects of preserving and strengthening the health of employees in corporate programs (scientific review). *Profilakticheskaya i klinicheskaya meditsina*, 2024, no. 4 (93), pp. 4–12 (in Russian).

5. Gurvich V.B., Gazimova V.G., Shastin A.S., Fedoruk A.A., Ruzakov V.O., Plotko E.G. The basic organizational problems of preventing morbidity of working population in modern conditions. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2018, no. 11, pp. 32–35. DOI: 10.31089/1026-9428-2018-11-32-35 (in Russian).

6. Ustinova O.Yu., Zaitseva N.V., Vlasova E.M., Kostarev V.G. Corporate programs for preventing health disorders among workers employed at adverse productions as a tool for occupational risk management. *Health Risk Analysis*, 2020, no. 2, pp. 72–82. DOI: 10.21668/health.risk/2020.2.08.eng

7. Zheglova A.V., Yatsyna I.V., Gavrilchenko D.S. Corporate health preservation programs are the main element of the health-saving system of the working population. *Zdravookhranenie Rossiiskoi Federatsii*, 2022, vol. 66, no. 5, pp. 385–389. DOI: 10.47470/0044-197X-2022-66-5-385-389 (in Russian).

8. Nikanov A.N., Vinnikov D.V., Syurin S.A., Shitikova E.D. Occupational diseases in pyrometallurgical nickel refining workers of various specialties. *ZNiSO*, 2024, vol. 32, no. 5, pp. 66–75. DOI: 10.35627/2219-5238/2024-32-5-66-75 (in Russian).

9. Panev N.I., Korotenko O.Yu., Filimonov S.N., Semenova E.A., Panev R.N. Prevalence of cardiovascular pathology in workers of the aluminum industry. *Gigiena i sanitariya*, 2019, vol. 98, no. 3, pp. 276–279. DOI: 10.18821/0016-9900-2019-98-3-276-279 (in Russian).

10. Syurin S.A., Kovshov A.A. Working conditions and work-related pathologies at enterprises located in Chukotka autonomous area. *Health Risk Analysis*, 2020, no. 4, pp. 98–105. DOI: 10.21668/health.risk/2020.4.11.eng

11. Chebotarev A.G., Sementsova D.D. Comprehensive assessment of working conditions and occupational disease rates at mining and metallurgical enterprises. *Gornaya promyshlennost'*, 2021, no. 1, pp. 114–119. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-1-114-119 (in Russian).

12. Bukhtiyarov I.V., Chebotarev A.G., Courierov N.N., Sokur O.V. Topical issues of improving working conditions and preserving the health of employees of mining enterprises. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2019, vol. 59, no. 7, pp. 424–429. DOI: 10.31089/1026-9428-2019-59-7-424-429 (in Russian).

13. Shur P.Z., Goryaev D.V. Sovremennye korporativnye programmy snizheniya professional'nogo riska zdorov'yu kak sredstva sokhraneniya trudovykh resursov [Modern corporate programs for reducing occupational health risks as a means of preserving human resources]. *Gumanizatsiya ekonomiki: blagopoluchie cheloveka i kreativnyi kapital: IX Permskii ekonomicheskii kongress [Humanization of the economy: human well-being and creative capital: IX Perm Economic*

Congress]. Perm, 2025. Available at: https://economcongress.ru/wp-content/uploads/2024/02/5-Shur-Goryaev.pdf (May 23, 2025) (in Russian).

14. Titova E.Ya., Golub' S.A. Contemporary problems of health protection for workers employed at a large industrial enterprise and working under occupational hazards. *Health Risk Analysis*, 2017, no. 4, pp. 83–90. DOI: 10.21668/health.risk/2017.4.09.eng

15. Shaikhlislamova E.R., Karimova L.K., Volgareva A.D., Muldasheva N.A. Occupational health of workers in underground occupations producing polymetalliccopperzinc ores. *Sanitarnyi vrach*, 2020, no. 5, pp. 9–22. DOI: 10.33920/med-08-2005-01 (in Russian).

16. Bukhtiyarov I.V., Chebotarev A.G., Prokhorov V.A. Problems of the promotion of healthy working environment, prevention of occupational diseases of the personnel of a mining and smelting complex. *Gornaya promyshlennost'*, 2015, no. 6 (124), pp. 14–17 (in Russian).

17. Denisenko M.B., Mkrtchyan N.V. Demograficheskie izmeneniya i predlozhenie rabochei sily v regionakh Rossii [Demographic changes and labor supply in the regions of Russia]. *Nauchnyi daidzhest*, 2022, no. 5 (10), 10 p. (in Russian).

18. Kontsevaya A.V. Korporativnye programmy ukrepleniya zdorov'ya v ramkakh Natsional'nogo proekta «Prodolzhitel'naya i aktivnaya zhizn'» [Corporate health promotion programs within the framework of the National Project «Long and Active Life»]. *Meditsinskii komponent korporativnykh programm ukrepleniya zdorov'ya na rabochem meste: vozmozhnosti 2025»: simpozium v ramkakh XX Vserossiiskogo foruma «Zdorov'e natsii – osnova protsvetaniya Rossii»* [*Medical Component of Corporate Health Promotion Programs at the Workplace: Possibilities for 2025: symposium within the framework of the XX All-Russian Forum "Health of the Nation – the Basis for Russia's Prosperity»*]. Moscow, May 14–16, 2025. Available at: https://docs.yandex.ru/docs/ view?tm=1750087297&tld (June 10, 2025) (in Russian).

19. Fokin V.A., Zaitseva N.V., Shur P.Z., Redko S.V., Khrusheva E.V. Assessing and predicting individual occupational risk and determining its exact categories using probabilistic methods.. *Health Risk Analysis*, 2021, no. 4, pp. 92–99. DOI: 10.21668/health.risk/2021.4.10.eng

20. Ponomareva T.A., Vorobeva A.A., Vlasova E.M., Ustinova O.Yu. Rehabilitation of employees of titanium-magnesium production with the installed disease of the upper respiratory ways. *Meditsina truda i ekologiya cheloveka*, 2019, no. 4 (20), pp. 39–49. DOI: 10.24411/2411-3794-2019-10046 (in Russian).

21. Zaitseva N.V., Kiryanov D.A., Zemlyanova M.A., Goryaev D.V., Ustinova O.Yu., Shur P.Z. Conceptual foundations of a corporate intelligent risk-based system for analysis, prediction and prevention of occupational and work-related health disorders of workers. *Health Risk Analysis*, 2023, no. 4, pp. 19–32. DOI: 10.21668/health.risk/2023.4.02.eng

22. Bukhriayrov I.V., Kuzmina L.P., Izmerova N.I., Golovkova N.P., Nepershina O.P. Improvement of mechanisms of detecting early signs of health disorders for preservation labor longevity. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2022, vol. 62, no. 6, pp. 377–387. DOI: 10.31089/1026-9428-2022-62-6-377-387 (in Russian).

23. Gridina N.V., Evdokimov I.A., Solodovnikov V.I. Construction of hybrid neural networks using fuzzy logic elements. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii*, 2019, no. 2, pp. 91–97. DOI: 10.14357/20718594190209 (in Russian).

24. Teslenko A. Neuro-fuzzy methods in the management of technical systems and objects. Yazyk v sfere professional'noi kommunikatsii: sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii prepodavatelei, aspirantov i studentov [Language in the Sphere of Professional Communication: Collection of Materials of the International Scientific and Practical Conference of Teachers, Postgraduates, and Students]. Ekaterinburg, Azhur Publ., 2020, pp. 698–703 (in Russian).

25. Andrievskaya N.V., Reznikov A.S., Cheranev A.A. Features of application of neuro fuzzy systems in systems of automatic control. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2014, no. 11–7, pp. 1445–1449 (in Russian).

26. Abushariah M.A.M., Alqudah A.A.M., Adwan O.Y., Yousef R.M.M. Automatic heart disease diagnosis system based on artificial neural network (ANN) and adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS) approaches. *Journal of software engineering and applications*, 2014, vol. 7, no. 12, pp. 1055–1064. DOI: 10.4236/jsea.2014.712093

27. Glushenko S.A. An adaptive neuro-fuzzy inference system for assessment of risks to an organization's information security. *Business Informatics*, 2017, no. 1 (39), pp. 68–77. DOI: 10.17323/1998-0663.2017.1.68.77 (in Russian).

28. Alkhashedi A.A., Obadi A.A., Nuriev N.K., Pechenyy E.A. Development of a mathematical model for recognition task requests of communications services. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2017, no. 6, pp. 9–14 (in Russian).

29. Yankovskaya A.E., Kitler S.V. Prinyatie reshenii na osnove parallel'nykh algoritmov testovogo raspoznavaniya obrazov [Decision-making based on parallel algorithms for test image recognition]. *Iskusstvennyi intellekt*, 2010, no. 3, pp. 151–152 (in Russian).

Zaitseva N.V., Savochkina A.A., Zemlyanova M.A., Goryaev D.V., Fadeev A.G. Methodology for assessing and predicting personalized occupational health risks based on adaptive neural fuzzy network for image recognition. Health Risk Analysis, 2025, no. 2, pp. 4–15. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.01.eng

Получена: 11.06.2025
Одобрена: 20.06.2025
Принята к публикации: 28.06.2025

ОЦЕНКА РИСКА В ГИГИЕНЕ

УДК 613; 614
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.02

Читать онлайн

Научная статья

ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЦИЛИНДРОСПЕРМОПСИНА В ВОДЕ ХОЗЯЙСТВЕННО-ПИТЬЕВОГО И КУЛЬТУРНО-БЫТОВОГО ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ РИСКА ЗДОРОВЬЮ НАСЕЛЕНИЯ

О.О. Синицына, В.В. Турбинский, М.В. Пушкарева, Н.В. Кузь, М.А. Ширяева, Г.В. Масальцев, В.В. Сафандеев

Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана, Российская Федерация, 141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Семашко, 2

Рост антропогенного загрязнения водных объектов, климатические изменения, образование водохранилищ и снижение скорости движения воды привели к ускорению процессов насыщения водоемов биогенными веществами, что, в свою очередь, стало причиной массового развития и распространения цианобактерий. Интенсификация процессов «цветения» водоемов наблюдается практически повсеместно. С точки зрения опасности для здоровья населения проблема массового развития токсичных цианобактерий в поверхностных водоемах питьевого и рекреационного назначения связана с возможностью образования в воде различных цианотоксинов, в том числе цилиндроспермопсина (ЦСП), который классифицируется Всемирной организацией здравоохранения как высокоприоритетный загрязнитель окружающей среды, что делает актуальным необходимость его изучения. Оценивая опыт зарубежных стран по исследованию содержания цианобактерий в водных объектах, следует отметить достаточно широкое видовое разнообразие сине-зеленых водорослей в зависимости от региональной распространенности.

Во многих странах мира в настоящее время расширен перечень веществ для контроля качества питьевой воды не только по содержанию продуктов жизнедеятельности цианобактерий, но и, в некоторых случаях, по содержанию их конкретного видового состава. В ряде работ зарубежных и отечественных исследователей показана необходимость своевременного принятия мер в области повышения безопасности питьевой воды путем нормирования продуктов жизнедеятельности цианобактерий.

Осуществлено обоснование величины предельно допустимой концентрации содержания ЦСП в воде хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.

Исследования включали анализ результатов научных исследований по физико-химическим свойствам и токсичности ЦСП, а также проведение субхронического эксперимента с изучением общетоксического, включая нейротоксическое, эмбриотоксического и тератогенного действия при условии внутрижелудочного поступления в организм животных.

Установлены параметры токсического действия ЦСП, класс опасности и обоснована величина предельно допустимой концентрации в воде на уровне 1,0 мкг/л, санитарно-токсикологический показатель вредности, первый класс опасности.

Ключевые слова: *цианотоксины, цилиндроспермопсин, общетоксическое действие, эмбриотоксическое действие, тератогенное действие, питьевая вода, предельно допустимая концентрация.*

© Синицына О.О., Турбинский В.В., Пушкарева М.В., Кузь Н.В., Ширяева М.А., Масальцев Г.В., Сафандеев В.В., 2025

Синицына Оксана Олеговна – член-корреспондент РАН, доктор медицинских наук, профессор, заместитель директора по научной работе (e-mail: sinitsyna.oo@fncg.ru; тел.: 8 (926) 447-08-74; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0241-0690).

Турбинский Виктор Владиславович – доктор медицинских наук, заведующий отделом гигиены воды (e-mail: turbinskii.vv@fncg.ru; тел.: 8 (920) 666-72-73; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7668-9324).

Пушкарева Мария Васильевна – доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник отдела гигиены воды (e-mail: pushkareva.mv@fncg.ru; тел.: 8 (912) 980-92-74; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5932-6350).

Кузь Надежда Валентиновна – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник отдела гигиены воды (e-mail: nadetzhda.v.k@gmail.com; тел.: 8 (903) 284-14-74; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7573-0185).

Ширяева Маргарита Александровна – младший научный сотрудник отдела гигиены воды (e-mail: Shiryaeva.MA@fncg.ru; тел.: 8 (903) 161-14-04; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8019-1203).

Масальцев Глеб Викторович – кандидат биологических наук, заведующий отделом токсикологии (e-mail: masalcev.gv@fncg.ru; тел.: 8 (916) 424-94-81; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1539-1633).

Сафандеев Виталий Васильевич – кандидат биологических наук, заведующий отделом ингаляционной токсикологии (e-mail: Visa.doc@mail.ru; тел.: 8 (929) 583-26-41; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0073-1677).

Рост антропогенного загрязнения водных объектов, климатические изменения, зарегулированность речного стока, образование водохранилищ и снижение скорости движения воды привели к ускорению процессов насыщения водоемов биогенными веществами, что, в свою очередь, стало причиной массового развития и распространения цианобактерий (ЦБ). С точки зрения опасности для здоровья населения проблема массового развития токсичных ЦБ в поверхностных водоемах питьевого и рекреационного назначения отнесена Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) к одной из приоритетных [1].

Интенсификация процессов «цветения» водоемов наблюдается практически повсеместно. По мнению А.В. Бакаева с соавт., бурное размножение сине-зеленых водорослей в водохранилищах представляет собой нередко разновидность чрезвычайной ситуации [2].

ВОЗ классифицирует цианотоксины по их преимущественному воздействию на организм человека и выделяет, прежде всего, гепатотоксины, нефротоксины и нейротоксины. Считается, что цианобактерии вида *Cylindrocpermopsis raciborskii* продуцируют токсичные соединения, в том числе цилиндроспермопсин (ЦСП), вызывающий при воздействии на организм, прежде всего, нарушения со стороны печени, желудочно-кишечного тракта и почек.

В нашей стране величина безопасного для здоровья человека содержания ЦСП в воде водных объектов и питьевой воде до сих пор не установлена, хотя многочисленные исследования отечественных авторов свидетельствуют об актуальности данной проблемы[1] [3–7].

Цель исследования – установление предельно допустимой концентрации (ПДК) ЦСП в воде хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.

Материалы и методы. На основе данных e-library, PubMed, Web of Science, Jstor, Open Access Button, Российской государственной библиотеки (РГБ), MedLine осуществлен поиск и анализ результатов научных исследований по физико-химическим свойствам и токсичности ЦСП, а также выполнен анализ нормативно-методических документов отечественного и международного законодательства по регулированию цианотоксинов в воде.

В качестве объекта исследования служил аналитический стандарт ЦСП, производство Испания, CAS 143545-90-8. Молекулярная формула – $C_{15}H_{21}N_5O_7S$, молярная масса – 399,42 г/моль.

Изучение влияния на процессы самоочищения водоемов, а также последующее обоснование ПДК ЦСП в воде проводили согласно методическим указаниям МУ 2.1.5.720-98 «Обоснование гигиенических нормативов химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования»[2].

Для исследования влияния ЦСП на процессы самоочищения в воде были выбраны концентрации 1,0; 10,0 и 100,0 мкг/ дм^3.

Принимая во внимание результаты ряда зарубежных авторов по токсикологическим исследованиям ЦСП, наличие нормативов в других странах мира, принято решение о сокращении продолжительности эксперимента до двух месяцев и применении методов прогноза для расчета $ПД_{хр}$. Исходя из материалов научного обзора литературы по ЦСП, а также руководствуясь МУ 2.1.5.720-98, для проведения экспериментальных исследований в условиях субхронического внутрижелудочного введения в организм белых крыс обоснованы дозы ЦСП на уровне 0,1 – 1,0 – 10,0 мкг/кг м.т., что составляет соответственно 1 / 14 000 000, 1 / 1 400 000 и 1 / 140 000 долю от $ЛД_{50}$.

Общетоксическое действие ЦСП изучали на конвенциональных белых крысах. Все работы с животными проводили в соответствии с принципами, изложенными в руководстве Р 1.2.3156-13 «Оценка токсичности и опасности химических веществ и их смесей для здоровья человека»[3], и в соответствии с заключением комиссии по биомедицинской этике ФБУН ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана от 21.11.2022, протокол № 03/22.

Животные получали ЦСП внутрижелудочно ежедневно на протяжении 60 дней, животные контрольной группы – дистиллированную воду в равном объеме. В течение всего эксперимента проводили наблюдение за состоянием животных, потреблением воды и корма, регистрировали динамику изменения массы тела, фиксировали клинические проявления воздействия объекта испытания на 15, 45-е и 60-е сутки эксперимента. В эти же сроки определяли гематологические и биохимические пока-

---

[1] Токсичность анатоксина-а при 3-месячном внутрижелудочном введении в организм белых крыс: свидетельство о регистрации базы данных / О.О. Синицына, В.В. Турбинский, Н.В. Кузь, Т.М. Ряшенцева, М.В. Пушкарева, Г.В. Масальцев, Т.Е. Вещемова, М.В. Вострикова. – Номер регистрации: RU 2023625000; дата публикации: 25.12.2023. – Заявка № 2023624658 от 08.12.2023.

[2] МУ 2.1.5.720-98. Обоснование гигиенических нормативов химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: методические указания / утв. и введ. в действие Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 15 октября 1998 г. [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200006903 (дата обращения: 10.03.2025).

[3] Р 1.2.3156-13. Оценка токсичности и опасности химических веществ и их смесей для здоровья человека: руководство / утв. врио Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 27 декабря 2013 г. [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200115595?ysclid=ma3l9lzp49885704016 (дата обращения: 10.03.2025).

затели крови, физиологические, включая поведенческие, показатели состояния животных.

По истечению срока эксперимента проведены эвтаназия животных, патолого-анатомическое вскрытие, макропатологические исследования внутренних органов и гистологическое изучение микропрепаратов.

Сыворотку крови исследовали на биохимическом анализаторе ChemWell® 2910 с определением аланинаминотрансферазы, альбумина, альфа-амилазы, аспартатаминотрансферазы, глюкозы, креатинина, лактатдегидрогеназы, холинэстеразы, мочевой кислоты, мочевины, общего белка, триглицеридов, хлоридов, холестерина, щелочной фосфатазы.

Гематологические исследования проводили на анализаторе Abacus Vet 5 Junior с определением количества лейкоцитов, лимфоцитов, моноцитов, нейтрофилов, лейкоцитарной формулы, эритроцитов, гемоглобина, гематокрита, среднего объема эритроцита, среднего содержания гемоглобина в эритроцитах, средней концентрации гемоглобина в эритроцитарной массе, распределения эритроцитов по величине.

Морфофункциональные исследования внутренних органов (щитовидная железа, тимус, сердце, легкое, желудок, печень, селезенка, поджелудочная железа, подвздошная кишка, толстая кишка, почки, надпочечники, семенники) проведены согласно [8] с использованием морфологических, морфометрических и стереометрических методов.

Изучение влияния на моторную, исследовательскую активность и когнитивные функции животных проводили на крысах в тесте «Открытое поле» (моторная компонента) и «Норковом тесте» (ориентировочно-исследовательская реакция)[4].

Состояние гиппокамп-зависимой (эксплицитной) и ассоциативной (имплицитной) памяти у крыс оценивали соответственно с помощью «Т-образного лабиринта» и виртуального лабиринта (тест «Что? Где? Когда?»).

В тесте «Т-образный лабиринт» крыс приучали к лабиринту в течение 3 суток, используя пищевое подкрепление. Далее проводили тестирование через один и два месяца. Во время каждого сеанса животные совершали по 10 пробежек. Данные по каждым 10 пробежкам в отдельности для каждого животного усредняли. Пробежка считалась правильной при захождении в рукав, в котором до этого размещалось положительное подкрепление.

Для оценки состояния ассоциативной (имплицитной) памяти в тесте «Что? Где? Когда?» каждое животное помещали в индивидуальную автоматизированную камеру, в противоположных областях которой размещали контейнеры с аттрактивным и индифферентным для крыс запахами.

Через 2 ч животное повторно помещали в индивидуальную автоматизированную камеру, в противоположных углах которой предъявляли разные стимулы – индифферентный (зона 1) и аттрактивный (зона 2) запахи. В течение 3 суток подряд проводили обучение животных всех групп и регистрировали время контакта животных с зоной размещения того или иного контейнера. После каждого тестирования для устранения запахов автоматизированные камеры обрабатывали 1: 1 раствором спирта с водой.

Длительность каждой обучающей сессии составляла 6 мин. Критерием обученности принимали более частые посещения зоны 2. На 4-е сутки для оценки кратковременной памяти убирали расположенные ранее в противоположных углах источники запахов. После этого отслеживали у крыс траекторию и количество их заходов в углы, в которых ранее были размещены аттрактивный и индифферентный запахи.

Эмбриотоксическое и тератогенное действие АТХ-а изучали на конвенциональных белых крысах в количестве 40 самок и 20 самцов. Все работы с животными проводились в соответствии с принципами, изложенными в руководстве Р 1.2.3156-13[5].

Спаривание самок проводили со здоровыми самцами в соотношении 2: 1 до начала экспозиции. Беременность у самок диагностировали при обнаружении сперматозоидов во влагалищных мазках. Опытные самки получали ЦСП в дозах 0,1, 1,0 и 10,0 мкг/кг м.т. перорально ежедневно от начала до 20-го дня беременности, самки контрольной группы – дистиллированную воду.

На протяжении всего эксперимента проводили наблюдение за состоянием животных, потреблением воды и корма, регистрировали динамику изменения массы тела, фиксировали клинические проявления. На 20-й день беременности животных умерщвляли и подвергали вскрытию для определения степени эмбриотоксического и тератогенного влияния по следующим показателям: количество плодов; общий вес помета; количество желтых тел; вес и длина эмбрионов; вес и диаметр плацент. Комплексные показатели рассчитывали по классическим формулам А.М. Малашенко и И.К. Егорова[6].

Из каждого помета отбирали по два эмбриона для определения абсолютной и относительной массы

---

[4] Методические рекомендации по использованию поведенческих реакций животных в токсикологических исследованиях для целей гигиенического нормирования. – Киев: Киевский НИИ ГТ и ПЗ, 1980. – 43 с.; Павленко С.М. Применение суммационно-порогового показателя в токсикологическом эксперименте на белых крысах // Методики санитарно-токсикологического эксперимента: сб. науч. тр. МНИИГ им. Ф.Ф. Эрисмана. – М., 1975. – С. 5–7.

[5] Р 1.2.3156-13. Оценка токсичности и опасности химических веществ и их смесей для здоровья человека: руководство / утв. врио Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 27 декабря 2013 г. [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200115595?ysclid=ma3l9lzp49885704016 (дата обращения: 10.03.2025).

[6] Малашенко А.М., Егоров И.Е. Доминантные летали у инбредных мышей под действием этиленимина // Генетика. – 1967. – № 3. – С. 59–68.

внутренних органов (тимус, сердце, легкие, печень и почки). Остальных эмбрионов делили на равные группы, которые служили материалом для изучения тератогенных эффектов по методу Вильсона – Дыбана[7], что сопровождалось оценкой общих признаков зрелости плода (прилипание ушных раковин, закрытие глаз, строение конечностей, хвоста); вторую группу помещали в 96%-ный этанол на 7 суток для последующего изучения скелетов по методике Доусона[8].

Обработку первичных данных осуществляли при помощи программы Microsoft Office Excel 2013, статистический анализ проводили в программе SPSS Statistics v. 22.0. Статистическую значимость различий сравниваемых показателей оценивали с помощью *t*-критерия Стьюдента при уровне значимости $p < 0{,}05$ ($t > 2$). Результаты представлены в виде $M \pm m$ (где: M – среднее значение параметра, m – стандартная ошибка среднего). Нормальность распределения данных проверяли по критерию Шапиро – Уилка, равность дисперсий – по критерию Ливиня. Наличие статистических выбросов проверяли методом построения ящичных диаграмм[9]. Сравнение между группами осуществляли либо при помощи однофакторного дисперсионного анализа с апостериорными сравнениями по Бонферрони (*F*-критерий, параметрические показатели), либо непараметрическим критерием Краскела – Уоллиса[9, 10]. Проверку наличия тренда в исследованиях (при значимом различии между группами) осуществляли методом ранговых корреляций Спирмена (двусторонний анализ)[11].

Результаты и их обсуждение. В результате проведенного обзора и анализа научных исследований на основе данных e-library, PubMed и Web of Science, нормативно-методических документов отечественного и международного законодательства по обнаружению цианотоксинов в воде, по оценке физико-химических свойств и токсичности ряда цианотоксинов, по изучению токсичности ЦСП в условиях внутрижелудочного поступления в организм теплокровных животных в условиях острого, кратковременного воздействия и данных по проявлению отдаленных эффектов действия установлено следующее.

ЦСП (в зарубежных исследованиях – CYN) – это алкалоид, вырабатываемый рядом видов ЦБ. Встречающиеся в природе структурные варианты: 7-эпи-CYN, 7-дезокси-CYN (рисунок), 7-дезоксидесульфо-CYN и 7-дезоксидесульфо-12-ацетил-CYN. Молекулярная формула: $C_{15}H_{21}N_5O_7S$.

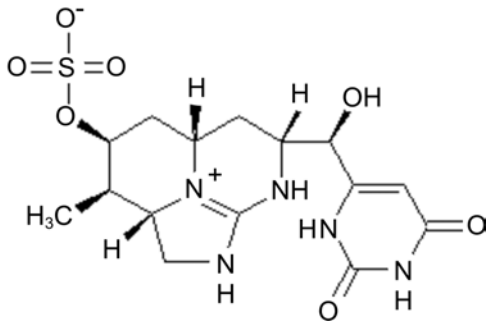


Рис. Структурная формула 7-дезокси-цилиндроспермопсина

ЦСП при поступлении в воду не изменяет ее эстетические свойства, не влияет на цвет и запах воды, не является летучим веществом, не разлагается при кипячении, относительно стабилен в темноте и при температуре от 4 до 50 °С сроком до пяти недель, устойчив к изменениям pH и остается стабильным до восьми недель при pH 4, 7 и 10 [1].

Ингаляционное воздействие возможно только при нанесении распылением, например, при орошении, во время штормов. В условиях окружающей среды основным водным путем воздействия ЦСП на человека является потребление питьевой воды, если она получена из неочищенных или недостаточно очищенных поверхностных вод. Другой путь воздействия возможен при условии рекреационного использования воды озер, рек и прибрежных территорий морей.

Показатели острой токсичности ЦСП по материалам зарубежных исследователей представлены следующими значениями: внутрибрюшинно острая токсичность (DL_{50}) – 20–65 мг/кг м.т.; при пероральном введении острая токсичность определена на уровне 1400 мг/кг м.т. [9–11]. При других путях поступления (интратрахеально) рядом авторов указаны более низкие смертельные дозы [12–14].

При поступлении ЦСП в организм животных с питьевой водой или через желудочный зонд в течение 21 и 14 дней рядом зарубежных исследователей установлена величина пороговой дозы подострого эксперимента – на уровне 66 и 150 мкг/кг м.т. соответственно [15, 16].

Согласно имеющимся в научной литературе исследованиям, печень и другие органы желудочно-кишечного тракта, а также почки являются важными

---

[7] Методические указания по изучению эмбриотоксического действия фармакологических веществ и влияние их на репродуктивную функцию / А.П. Дыбан, В.Ф. Пучков, Н.А. Чеботарь [и др.]. – М.: Минздрав СССР, 1986. – 21 с.

[8] Дыбан А.П., Баранов В.С., Акимова И.М. Основные методические подходы к тестированию тератогенной активности химических веществ // Архив анатомии, гистологии и эмбриологии. – 1970. – Т. 59, № 10. – С. 89–100.

[9] Халафян А.А. Statistica 6. Статистический анализ данных: учебник. – 3-е изд. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. – 512 с.

[10] Abdi H. The Bonferroni and Šidák corrections for multiple comparisons // Encyclopedia of measurement and statistics. – USA: SAGE Publ., 2007. – № 3. – P. 103–107.

[11] Corder G.W., Foreman D.I. Nonparametric statistics: A step-by-step approach. – 2nd ed. – USA: Wiley Publ., 2014. – 288 p.; Agresti A. Categorical data analysis. – 2nd ed. – USA: Wiley Publ., 2002. – 734 p.

мишенями воздействия ЦСП при более длительном поступлении в организм животных с питьевой водой в дозах от 60 до 657 мкг/кг м.т. [11, 17–19]. Внутрижелудочное введение ЦСП в течение 11 недель в дозах 60–240 мкг/кг м.т. приводило к увеличению относительной массы почек, печени. Некротические или воспалительные очаги в печени отмечали у 60 % мышей при дозе 120 мкг/кг м.т., у 90 % мышей – при дозе 240 мкг/кг м.т. [11].

У беременных мышей, получавших очищенный ЦСП с помощью внутрибрюшинных инъекций три раза в день в дозе 64 мкг/кг м.т., были отмечены смертельные исходы. Относительный вес печени у выживших был значительно увеличен, однако не было отмечено влияния на вес плодов, их смертность, изменения скелетных или мягких тканей [20]. Некоторые исследователи сообщали о геморрагических поражениях в ряде тканей, включая желудочно-кишечный тракт [21].

Авторы не наблюдали генотоксичности в клетках яичника китайских хомячков (CHO-K1), подвергнутых воздействию ЦСП в концентрациях 0,5 и 1 мкг/мл, несмотря на индукцию нецитотоксических эффектов на морфологию клеток и структуру микротрубочек [22].

Рядом зарубежных авторов при воздействии высоких доз ЦСП установлены мутагенные и канцерогенные эффекты. При этом исследования бактериальной мутагенности с использованием штаммов *Salmonella Typhimurium* TA98, TA100, TA1535, TA1537 и штаммов *Escherichia coli* WP2 uvrA и WP2 [pKM101] не продемонстрировали мутагенной активности ЦСП [23]. Изучение генотоксичности клеток млекопитающих выявило мутагенные эффекты, в частности, на гепатоцитах человека клеточные линии показали повышенное содержание многоядерных и двуядерных клеток.

В эксперименте на швейцарских мышах-альбиносах зарубежными исследователями обнаружены неопластические изменения у мышей, получавших ЦСП на уровне 2,75 или 8,25 мг/кг м.т. Однако эти изменения не являлись статистически значимыми по сравнению с контролем. По мнению авторов, неопластические изменения, произошедшие у животных в разных органах-мишенях, предоставляют на сегодня неоднозначные доказательства канцерогенности ЦСП [23, 24].

Следует отметить, что механизм токсического действия малых доз ЦСП в условиях длительного перорального поступления до настоящего времени полностью не изучен.

Многие страны мира расширили перечень показателей контроля качества питьевой воды как по содержанию ЦБ, так и продуктов их жизнедеятельности, при этом указывая на значимость проводимых исследований внутри своей страны и показывая другим странам необходимость мер в области повышения безопасности питьевой воды путем нормирования ЦБ и цианотоксинов, в том числе ЦСП. Анализ позволил установить, что Австралия, Бразилия, Новая Зеландия используют в качестве критериев нормирования питьевой воды по содержанию ЦБ и токсинов свои собственные исследования (табл. 1) и не ограничиваются только рекомендациями ВОЗ[12] [1, 25–27].

Таблица 1

Нормативы цилиндроспермопсина в питьевой воде разных стран мира

Страна	Норматив	Допустимая величина
Австралия	*Cylindrospermopsin*	1 мкг/л
Бразилия	*Cylindrospermopsin*	15 мкг/л
Новая Зеландия	*Cylindrospermopsin*	1 мкг/л

Из всех цианотоксинов в нашей стране научно обоснована и внедрена в практику ПДК только микроцистина-LR в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования на уровне 0,001 мг/л, 1-й класс опасности, санитарно-токсикологический показатель вредности СанПиН 2.1.3685-21[13].

Исследования процессов самоочищения воды в модельных водоемах, проведенные с использованием трех концентраций ЦСП: 1,0; 10,0 и 100,0 мкг/л, показали отсутствие влияния на процессы биохимического потребления кислорода в течение 5 суток.

За время проведения субхронического эксперимента при воздействии экспозиционных доз ЦСП на уровне 0,1; 1,0 и 10,0 мкг/кг м.т отсутствовала спонтанная гибель животных, не обнаружено значимых различий в приросте массы тела, не выявлено достоверных отличий в абсолютной и относительной массе внутренних органов животных контрольной и опытных групп.

Гематологический анализ крови животных на 30, 45-й и 60-й день исследования показал, что показатели лабораторных животных, получавших дозы ЦСП 0,1; 1,0 и 10 мкг/кг м.т., во все сроки наблюдения значимо не отличались от показателей контрольных животных.

Биохимический анализ сыворотки крови на 60-й день экспозиции выявил значимые отклонения ряда показателей у животных, получавших дозу 10,0 мкг/кг м.т. ЦСП, по сравнению с контрольными

[12] NHMRC, NRMMC. National Water Quality Management Strategy. Australian Drinking Water Guidelines 6. – Australia, Canberra: Australian Government, 2011.

[13] СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: санитарные правила и нормы (с изменениями на 30 декабря 2022 г.) / утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2 [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/573500115 (дата обращения: 12.03.2025).

Таблица 2

Изменения биохимических показателей сыворотки крови крыс, индикаторы функционального состояния (печени)

Доза ЦСП, мкг/кг м.т.	Среднее значение ± стд. ошибка				
	Аланинаминотрансфераза, Ед/л	Альбумин, г/л	Аспартатаминотрансфераза, Ед/л	Глюкоза, моль/л	Креатинин, мкмоль/л
15 дней					
Контроль	72,74 ± 5,88	39,24 ± 0,43	158,53 ± 9,87	7,70 ± 0,26	109,15 ± 3,16
0,1	72,63 ± 5,48	38,68 ± 0,66	161,52 ± 10,84	7,23 ± 0,20	115,64 ± 2,75
1,0	64,10 ± 5,08	35,60 ± 0,65	143,27 ± 7,75	6,85 ± 0,26	108,10 ± 4,20
10,0	82,14 ± 3,49	39,42 ± 0,42	179,01 ± 9,97	7,56 ± 0,28	121,02 ± 4,71
45 дней					
Контроль	60,79 ± 4,55	39,03 ± 0,68	222,15 ± 12,42	9,09 ± 0,47	116,46 ± 4,32
0,1	58,85 ± 2,76	39,29 ± 0,30	211,68 ± 8,51	9,15 ± 0,16	126,09 ± 3,90
1,0	59,68 ± 2,73	38,62 ± 0,64	229,07 ± 11,26	8,63 ± 0,25	118,06 ± 1,84
10,0	65,10 ± 4,23	40,44 ± 0,50	233,96 ± 15,67	9,40 ± 0,33	130,11 ± 5,89
60 дней					
Контроль	59,23 ± 3,08	38,35 ± 0,68	123,83 ± 6,12	8,01 ± 0,23	108,06 ± 3,67
0,1	62,56 ± 3,83	38,63 ± 0,51	120,64 ± 4,67	7,94 ± 0,16	102,18 ± 3,25
1,0	57,81 ± 3,01	37,04 ± 0,70	121,82 ± 7,31	8,56 ± 0,27	106,23 ± 3,41
10,0	**↑75,03 ± 4,44***	**↓27,08 ± 0,22***	**↑158,97 ± 5,52***	**↑9,26 ± 0,25***	**↑140,48 ± 4,77***

Примечание: * – статистическая значимость $p < 0,05$.

Таблица 3

Изменения биохимических показателей сыворотки крови крыс, индикаторы функционального состояния почек

Доза ЦСП, мкг/кг м.т.	Среднее значение ± стд. ошибка			
	Мочевая кислота, мкмоль/л	Мочевина, моль/л	Общий белок, г/л	Триглицериды, моль/л
15 дней				
Контроль	132,01 ± 17,97	7,24 ± 0,33	68,98 ± 1,08	0,57 ± 0,05
0,1	135,57 ± 20,86	6,66 ± 0,38	70,39 ± 0,98	0,43 ± 0,02
1,0	148,98 ± 17,32	7,71 ± 0,32	71,16 ± 1,27	0,47 ± 0,04
10,0	141,06 ± 5,63	7,82 ± 0,68	70,45 ± 0,77	0,48 ± 0,03
45 дней				
Контроль	45,50 ± 5,57	7,11 ± 0,32	70,06 ± 0,68	0,78 ± 0,10
0,1	54,75 ± 9,37	7,47 ± 0,52	70,19 ± 0,63	0,68 ± 0,09
1,0	48,58 ± 10,16	7,44 ± 0,35	69,97 ± 0,93	0,62 ± 0,05
10,0	47,04 ± 11,63	6,81 ± 0,40	69,70 ± 0,76	0,63 ± 0,06
60 дней				
Контроль	60,54 ± 10,13	6,30 ± 0,28	67,90 ± 1,05	0,69 ± 0,08
0,1	69,40 ± 9,86	6,04 ± 0,40	68,26 ± 0,89	0,54 ± 0,05
1,0	60,54 ± 7,20	7,30 ± 0,50	68,12 ± 0,86	0,65 ± 0,08
10,0	**↓39,28 ± 6,98***	**↓4,23 ± 0,28***	**↓48,19 ± 0,58***	**↑0,82 ± 0,06***

Примечание: * – статистическая значимость $p < 0,05$.

животными. Установлено достоверное увеличение содержания аланинаминотрансферазы, аспартатаминотрансферазы, глюкозы, креатинина, триглицеридов при достоверном снижении альбумина, мочевой кислоты, мочевины и общего белка (табл. 2 и 3).

У животных, получавших дозу ЦСП 10 мкг/кг м.т., к концу эксперимента выявлено увеличение моторной активности в тесте «Открытое поле» и исследовательской активности в тесте «Норковый тест» по сравнению с контрольной группой животных (табл. 4).

В тесте «Т-образный лабиринт» у животных, получивших ЦСП в дозе 10,0 мкг/кг м.т., выявлено снижение количества правильных пробежек и увеличение времени их выполнения по сравнению с параметрами контрольной группы (табл. 5).

В тесте «Что? Где? Когда?» при соблюдении критерия обученности, что можно подтвердить наиболее частым посещением зоны 2 животными всех групп до начала введения ЦСП (фон), установлено отсутствие влияния ЦСП на имплицитную (ассоциативную) память.

При микроскопическом изучении гистологических препаратов различных органов животных, получавших ЦСП в дозе 10 мкг/кг м.т., установлены достоверные морфофункциональные изменения в следующих органах: в печени наблюдали увеличение степени жировой дистрофии и микронекрозов;

Таблица 4

Показатели моторной и исследовательской активности животных в тестах «Открытое поле» и «Норковый тест»

Доза ЦСП, мкг/кг м.т.	Фон	30 дней	60 дней
«Открытое поле», пройденный путь, см			
Контроль	1648 ± 71,52	533,99 ± 150,30	578,93 ± 116,65
0,1	1472,38 ± 101,99	570,48 ± 112,03	686,33 ± 119,05
1,0	1453,09 ± 112,98	562,77 ± 177,51	959,73 ± 202,67
10,0	1638,84 ± 145,40	895,40 ± 235,10	**1303,30 ± 67,07***
«Норковый тест», количество событий			
Контроль	46,30 ± 7,22	8,10 ± 2,34	8,80 ± 2,20
0,1	43,20 ± 5,26	13,20 ± 3,65	11,40 ± 2,10
1,0	37,30 ± 3,34	9,90 ± 3,02	10,50 ± 3,63
10,0	41,70 ± 4,04	15,90 ± 3,83	**20,60 ± 1,18***

Примечание: * – статистическая значимость $p < 0,05$.

Таблица 5

Показатели гиппокамп-зависимой (эксплицитной) памяти животных в тесте «Т-образный лабиринт»

Доза ЦСП, мкг/кг м.т.	Фон	30 дней	60 дней
Количество правильных пробежек, %			
Контроль	26,67 ± 9,69	36,80 ± 10,52	33,33 ± 11,11
0,1	23,37 ± 7,14	23,33 ± 8,69	37,04 ± 10,31
1,0	26,73 ± 9,73	26,67 ± 10,89	40,00 ± 8,31
10,0	30,03 ± 9,27	**13,27 ± 5,42***	36,67 ± 9,23
Время выполнения пробежки, с			
Контроль	42,05 ± 13,86	47,18 ± 9,06	59,22 ± 18,59
0,1	39,20 ± 12,38	35,86 ± 24,45	48,99 ± 11,54
1,0	64,80 ± 2,96	48,14 ± 16,65	27,06 ± 6,63
10,0	47,00 ± 11,72	**102,00 ± 17,01***	25,87 ± 8,82

Примечание: * – статистическая значимость $p < 0,05$.

в почке регистрировали увеличение индекса альтерации почечных клубочков и некрозов клубочков; в желудке и толстом кишечнике выявлена гиперсекреция желез; в семеннике отмечено увеличение отхождения слоев сперматогенных клеток от базальной мембраны семенных канальцев, а также повышенная разреженность сперматид и сперматозоидов; в щитовидной железе отмечено увеличение десквамации тироцитов.

В экспериментальных исследованиях эмбриотоксического и тератогенного действия установлено, что во всех опытных группах отсутствовала спонтанная гибель животных. Не выявлено достоверных изменений массы тела беременных самок, средний прирост массы тела опытных самок за время беременности соответствовал по величине среднему значению показателя контрольных крыс. Не выявлено статистически достоверных изменений абсолютной и относительной массы внутренних органов эмбрионов, а также достоверных изменений показателей эмбриогенеза в опытных группах по сравнению с данными контрольной группы. Средние количества желтых тел, мест имплантации, количество живых плодов, общий вес плодов в помете, краниокаудальный размер плодов, диаметр и вес плаценты у опытных животных статистически не отличались от контрольных значений. Показатели доимплантационной, постимплантационной и общей гибели потомства в опытных группах соответствовали аналогичным параметрам параллельного контроля и не имели статистически значимого отличия.

Прижизненное макроскопическое обследование плодов не обнаружило грубых пороков развития. Последующее микроанатомическое изучение зафиксированного плодного материала и анализ поперечных срезов головного мозга и внутренних органов показал, что внутренние органы плодов опытных групп сохраняли обычное расположение и структуру, их строение и топография не имели отличий от контрольных данных. Выявленные нарушения эмбриогенеза не отличались разнообразием, были немногочисленными и встречались с одинаково низкой частотой во всех группах животных, что не позволило связать их возникновение с влиянием ЦСП на процессы формирования и внутриутробного развития вынашиваемого потомства.

Оценка состояния скелета плодов с просветленными мягкими тканями в опытных группах и контрольной не выявила нарушений остеогенеза и десинхронизации процессов оссификации хрящевых закладок, что подтверждает отсутствие тератогенных эффектов действия ЦСП.

Обсуждение результатов и обоснование ПДК ЦСП в воде. Оценивая материалы по регулированию и контролю содержания ЦСП в воде водных объектов и питьевой воде, необходимо подчеркнуть, что имеющиеся зарубежные нормативные величины основываются исключительно на изучении токсических свойств в экспериментальных условиях. Отечественная практика обоснования гигиенических нормативов веществ в воде базируется не только на установлении недействующих концентраций токсического действия на организм лабораторных животных, но, согласно МУ 2.1.5.720-98[14], включает определение пороговых концентраций по влиянию веществ на органолептические свойства воды и общий санитарный режим водоемов, гигиенический норматив устанавливается по лимитирующему показателю вредности, имеющему наименьшую недействующую или пороговую концентрацию.

При обосновании ПДК ЦСП в воде хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования не устанавливали пороговые концентрации по влиянию на органолептические свойства воды, поскольку в литературе представлена информация об отсутствии влияния ЦСП на эстетические свойства воды, а также учитывая то обстоятельство, что привлечение добровольцев в эксперимент с высокотоксичным и малоизученным в канцерогенном отношении соединением может обусловить риск негативного воздействия на здоровье экспериментаторов.

Исследования в модельных водоемах показали отсутствие влияния на процессы самоочищения воды, что согласуется с мнением отечественных исследователей, которые считают, что биоценоз «цветущих» водоемов является более устойчивым к цианометаболитам, объясняя это результатом коэволюционного сосуществования в природе с токсигенными цианобактериями[15].

Руководствуясь МУ 2.1.5.720-98[14], при проведении экспериментальных исследований в условиях субхронического эксперимента для установления пороговой величины ЦСП по общетоксическому действию, а также для выявления возможных отдаленных эффектов действия (эмбриотоксического и тератогенного) были обоснованы дозы на уровне 0,1 – 1,0 – 10,0 мкг/кг м.т.

В ходе субхронического эксперимента под воздействием дозы ЦСП 10,0 мкг/кг м.т. у опытных животных установлен целый ряд изменений биохимических показателей сыворотки крови, характеризующих нарушения ферментообразующей функции печени, белкового и углеводного обмена, а также изменения ряда функциональных показателей почек, что в полной мере корреспондируется с многочисленными исследованиями зарубежных авторов [15, 16, 18, 19, 28].

Кроме того, у подопытной группы животных, получавших ЦСП в дозе 10,0 мкг/кг, по сравнению с контрольной группой животных, к концу хронического эксперимента выявлено увеличение моторной активности в тесте «Открытое поле» и исследовательской активности в тесте «Норковый тест».

Выявленные изменения объясняются тем, что основным механизмом действия ЦСП является ингибирование синтеза белка, включая синтез трипептида глутатиона, что приводит к окислительному стрессу, который, в свою очередь, вызывает усиление перекисного окисления липидов и повреждение ДНК[16] [28–33]. ЦСП способен проникать через гематоэнцефалический барьер [34, 35], снижать количество синапсов, следовательно, способен оказывать нейротоксический эффект. При этом сами нейротоксические эффекты ЦСП до сих пор недостаточно изучены [36]. Поэтому в данном исследовании проводили оценку влияния ЦСП на когнитивные функции животных в тестах, которые способны выявить нарушения запоминания, распознавания и воспроизведения, а также исследовательской активности.

Наибольший интерес для нас представляли изменения эксплицитной памяти у животных, поскольку она связана с деятельностью гиппокампа головного мозга и является осознанной. Выявлено снижение количества правильных пробежек и увеличение времени их выполнения в тесте «Т-образный лабиринт», что указывает на нарушение гиппокамп-зависимой памяти у крыс, получивших ЦСП в дозе 10 мкг/кг м.т. Такое нарушение могло произойти вследствие описанных в литературе изменений в организме в виде снижения активности ацетилхолинэстеразы и повышения уровня липопероксидации с сопутствующими гистопатологическими изменениями в мозге животных, подвергавшихся субхроническому воздействию ЦСП [34]. Восстановление показателей до уровня контрольных данных к концу второго месяца воздействия ЦСП можно расценивать как активацию компенсаторных механизмов.

Нарушение эксплицитной памяти может приводить к «накопительному забыванию» посещения площадок в тесте «Открытое поле», что является

---

[14] МУ 2.1.5.720-98. Обоснование гигиенических нормативов химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: методические указания / утв. и введ. в действие Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 15 октября 1998 г. [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200006903 (дата обращения: 10.03.2025).

[15] Семенова А.С. Коэволюция цианобактерий и зоопланктона: защитная роль цианотоксинов: Грант № 15-04-04030. – М.: Российский фонд фундаментальных исследований, 2015.

[16] Electron microscopic studies on experimental poisoning in mice induced by cylindrospermopsin isolated from blue-green-alga Umezakia natans / K. Terao, S. Ohmori, K. Igarashi, I. Ohtani, M.F. Watanabe, K.I. Harada, E. Ito, M. Watanabe // Toxicon. – 1994. – Vol. 32, № 7. – P. 833–843. DOI: 10.1016/0041-0101(94)90008-6

причиной увеличения длины пройденного пути, а также увеличения количества заглядываний в норки в «Норковом тесте» при введении ЦСП вследствие описанного повреждения нейронов на синаптическом уровне [35].

Исследования гистологических препаратов органов животных, получавших ЦСП в дозе 10 мкг/кг м.т., выявили значительные изменения со стороны печени в виде жировой дистрофии вплоть до микронекрозов, что согласуется с [11, 15, 16, 19, 28]; в почке – некрозы почечных клубочков, в желудке и кишечнике – гиперсекреция желез, что согласуется с [18]. Выявленные морфофункциональные изменения внутренних органов животных свидетельствуют, в первую очередь, о нарушении нормальной работы печени, почек и желудочно-кишечного тракта.

Изучение эмбриотоксического действия ЦСП в эксперименте не выявило статистически достоверных изменений абсолютной и относительной массы внутренних органов эмбрионов опытных групп по сравнению с контрольными данными. Показатели эмбриогенеза у животных опытных групп также не подтвердили статистически достоверных изменений по сравнению с контрольной группой, что свидетельствует об отсутствии эмбриотоксического действия ЦСП.

Не обнаружено изменений в количестве костей плодов или их строении, также не выявлено значимых пороков развития костной ткани. При исследовании патологии внутренних органов у ряда животных отмечены единичные изменения, которые, однако, не подтверждали зависимость от полученной дозы ЦСП ($p > 0,05$). Анализ выявленных отклонений относительно данных контрольной группы дает основания сделать вывод, что все испытанные в эксперименте дозы не проявляют тератогенного действия на организм.

Обнаруженные рядом исследователей неопластические изменения в органах-мишенях различных животных предоставляют неоднозначные доказательства канцерогенности, что требует дальнейшего изучения [29, 30].

Учитывая достоверные изменения биохимических показателей крови, изменение моторной и исследовательской активности животных, а также морфофункциональные нарушения внутренних органов, доза ЦСП 10,0 мкг/кг м.т. оценена как действующая по общетоксическому признаку в условиях субхронического эксперимента, дозы 1,0 и 0,1 мкг/кг м.т – как недействующие.

Для обоснования ПДК ЦСП в воде хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования согласно п. 10.3 МУ 2.1.5.720-98 и табл. 10.2 выбрана величина коэффициента J ($J1 = 20$) для расчета пороговой дозы хронического действия в зависимости от степени изученности характера токсического действия вещества и структурного ряда, к которому оно принадлежит, по отношению DL_{50} / $ПД_{ПЭК}$ установлен первый класс опасности и величина $ПД_{хр}$ на уровне 3,3 мкг/кг м.т.

С учетом стабильности ЦСП, согласно табл. 5.2 МУ 2.1.5.720-98, введен коэффициент запаса 5, величина $ПД_{хр}$ составила 0,66 мкг/кг м.т.

Согласно п. 11.7 МУ 2.1.5.720-98 расчет $МНД_{хр}$ хронического опыта проводили в соответствии с табл. 11.1. и использованием коэффициента запаса, равного 10. С учетом данного коэффициента величина $МНД_{хр.}$ ЦСП в условиях перорального поступления в организм теплокровных животных составила 0,06 мкг/кг м.т.

В табл. 6 представлены показатели комплексной оценки опасности содержания ЦСП в воде.

Максимальная недействующая концентрация ($МНК_{хр.}$) ЦСП в воде по санитарно-токсикологическому показателю вредности согласно пересчетной формуле, которая учитывает среднюю массу тела человека (60 кг) и суточное водопотребление (3 л), составила 1,2 мкг/л.

Таблица 6

Показатели комплексной оценки опасности содержания ЦСП в воде

Показатель	Определяемые значения	Источник данных	Установленные величины
Устойчивость в водной среде	Стабильность	[1]	Стабилен
Влияние на органолептические свойства воды	Влияние на запах, цвет	[1]	Не влияет
Влияние на процессы самоочищения воды*	$ПК_{сан}$		Более 100,0 мкг/л
Токсикологические исследования			
Острый эксперимент	$ЛД_{50}$	сноски 6, 8, 9	1400 мг/кг м.т.
Подострый эксперимент	$ПД_{пэк}$	[9, 10]	66,0 мкг/кг м.т.
Субхронический эксперимент*	$ПД_{хр}$ расчетная $МНД_{хр}$ расчетная Класс опасности	МУ 2.1.5.720-98	3,3 мкг/кг м.т. 0,06 мкг/кг м.т. 1 кл.оп.
Отдаленные эффекты действия			
Мутагенное		[11]	Проявлялось в высоких дозах
Канцерогенное		[17, 18]	Проявлялось в высоких дозах
Эмбриотоксическое*	$ПД_{отд}$		Более 10,0 мкг/кг м.т.
Тератогенное*	$ПД_{отд}$		Более 10,0 мкг/кг м.т.

Примечание: * – собственные исследования.

Выводы. Таким образом, с учетом отсутствия порога действия на органолептические свойства воды и отсутствия влияния на процессы самоочищения в концентрациях до 100 мкг/л ПДК ЦСП в воде хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования рекомендована на уровне 1,0 мкг/л, санитарно-токсикологический показатель вредности, первый класс опасности.

Для проведения контроля содержания ЦСП в воде разработаны МУК «Количественное определение цилиндроспермопсина в питьевой и природной воде методом иммуноферментного анализа» (нижний предел измерения – 0,00005 мг/л).

Финансирование. Исследование выполнено в рамках реализации государственной программы «Обеспечение химической и биологической безопасности Российской Федерации» на 2021–2024 гг.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Всемирная организация здравоохранения. Руководство по обеспечению качества питьевой воды, 4-е изд. [Электронный ресурс] // WHO Documentation Centre in Russia. – 2017. – URL: https://whodc.mednet.ru/en/main-publications/okruzhayushhaya-sreda-i-zdorove/kachestvo-vody/3572.html (дата обращения: 11.01.2025).

2. Бакаев А.В., Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. «Цветение» сине-зеленых микроводорослей (Cyanophyta) – разновидность чрезвычайных ситуаций в водохранилищах // Инженерный вестник Дона. – 2012. – Т. 23, № 4–2. – С. 144.

3. Кузь Н.В., Жолдакова З.И. Проблема "цветения" водоисточников. Оценка влияния процессов водоподготовки на содержание цианобактерий в питьевой воде хозяйственно-питьевого водоснабжения города Москвы // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. – 2017. – № 9 (294). – С. 35–39.

4. Егорова Н.А., Кузь Н.В., Синицына О.О. Материалы к обоснованию гигиенического норматива микроцистина-LR в воде водных объектов // Гигиена и санитария. – 2018. – Т. 97, № 11. – С. 1046–1052. DOI: 10.18821/0016-9900-2018-97-11-1046-52

5. Кузь Н.В., Синицына О.О., Турбинский В.В. Цветение водоисточников – новые вызовы безопасности питьевого водоснабжения в условиях изменения климата // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути решения. – 2022. – Т. 17, № 1. – С. 218–225.

6. Морфофункциональные изменения в организме животных при пероральном воздействии анатоксина-а в условиях субхронического эксперимента / О.О. Синицына, В.В. Турбинский, М.В. Пушкарева, Н.В. Кузь, Г.В. Масальцев, М.А. Ширяева, Т.М. Ряшенцева, Е.А. Вальцева, М.В. Вострикова // Токсикологический вестник. – 2024. – Т. 32, № 6. – С. 336–347. DOI: 10.47470/0869-7922-2024-6-336-347

7. Проблема цветения воды источников питьевого водоснабжения населения / В.В. Турбинский, И.В. Брагина, Н.В. Кузь, О.О. Синицына, М.В. Пушкарева // Гигиена и санитария. – 2024. – Т. 103, № 12. – С. 1466–1472. DOI: 10.47470/0016-9900-2024-103-12-1466-1472

8. Количественная структурно-функциональная оценка различных систем организма лабораторных животных в гигиенических исследованиях / Н.Н. Беляева, В.Н. Ракитский, Н.И. Николаева, М.В. Вострикова, Т.Е. Вещемова // Гигиена и санитария. – 2020. – Т. 99, № 12. – С. 1438–1445. DOI: 10.47470/0016-9900-2020-99-12-1438-1445

9. Falconer I.R. An overview of problems caused by toxic blue–green algae (cyanobacteria) in drinking and recreational water // Environmental Toxicology (Wiley). – 1999. – Vol. 14, № 1. – P. 5–12.

10. Falconer I.R. Toxic cyanobacterial bloom problems in Australian waters: risks and impacts on human health // Phycologia. – 2001. – Vol. 40, № 3. – P. 228–233. DOI: 10.2216/i0031-8884-40-3-228.1

11. Falconer I.R., Humpage A.R. Cyanobacterial (blue-green algal) toxins in water supplies: Cylindrospermopsins // Environ. Toxicol. – 2006. – Vol. 21, № 4. – P. 299–304. DOI: 10.1002/tox.20194

12. Seawright J. Testing for necessary and/or sufficient causation: Which cases are relevant? // Political Analysis. – 2002. – Vol. 10, № 2. – P. 178–193. DOI: 10.1093/pan/10.2.178

13. Distribution of 14C cylindrospermopsin in vivo in the mouse / R.L. Norris, A.A. Seawright, G.R. Shaw, M.J. Smith, R.K. Chiswell, M.R. Moore // Environ. Toxicol. – 2001. – Vol. 16, № 6. – P. 498–505.

14. Cordeiro-Araújo M.K., Bittencourt-Oliveira M.C. Active release of microcystins controlled by an endogenous rhythm in the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* // Phycological Research. – 2013. – Vol. 61, № 1. – P. 1–6.

15. Reisner A.D. The common factors, empirically validated treatments, and recovery models of therapeutic change // Psychol. Rec. – 2005. – Vol. 55. – P. 377–399. DOI: 10.1007/BF03395517

16. Cylindrospermopsin, a cyanobacterial alkaloid: evaluation of its toxicologic activity / G.R. Shaw, A.A. Seawright, M.R. Moore, P.K. Lam // Ther. Drug Monit. – 2000. – Vol. 22, № 1. – P. 89–92. DOI: 10.1097/00007691-200002000-00019

17. Humpage A.R., Falconer I.R. Oral toxicity of the cyanobacterial toxin cylindrospermopsin in male Swiss albino mice: determination of no observed adverse effect level for deriving a drinking water guideline value // Environ. Toxicol. – 2003. – Vol. 18, № 2. – P. 94–103. DOI: 10.1002/tox.10104

18. Oral toxicity of the cyanobacterial toxin cylindrospermopsin in mice: Long-term exposure to low doses / A. Sukenik, M. Reisner, S. Carmeli, M. Werman // Environ. Toxicol. – 2006. – Vol. 21, № 6. – P. 575–582. DOI: 10.1002/tox.20220

19. A critical review of the postulated role of the non-essential amino acid, β-N-methylamino-L-alanine, in neurodegenerative disease in humans / N. Chernoff, D.J. Hill, D.L. Diggs, B.D. Faison, B.M. Francis, J.R. Lang, M.M. Larue, T.-T. Le [et al.] // J. Toxicol. Environ. Health B Crit. Rev. – 2017. – Vol. 20, № 4. – P. 1–47. DOI: 10.1080/10937404.2017.1297592

20. State of knowledge and concerns on cyanobacterial blooms and cyanotoxins / S. Merel, D. Walker, R. Chicana, S. Snyder, E. Baures, O. Thomas // Environ. Int. – 2013. – Vol. 59. – P. 303–327. DOI: 10.1016/j.envint.2013.06.013

21. Early hippocampal cell death, and late learning and memory deficits in rats exposed to the environmental toxin BMAA (beta-N-methylamino-L-alanine) during the neonatal period / O. Karlsson, E. Roman, A.-L. Berg, E.B. Brittebo // Behav. Brain Res. – 2011. – Vol. 219, № 2. – P. 310–320. DOI: 10.1016/j.bbr.2011.01.056

22. Identification of Microcystis aeruginosa Peptides Responsible for Allergic Sensitization and Characterization of Functional Interactions between Cyanobacterial Toxins and Immunogenic Peptides / E.N. Geh, D. Ghosh, M. McKell, A.A. de la Cruz, G. Stelma, J.A. Bernstein // Environ. Health Perspect. – 2015. – Vol. 123, № 11. – P. 1159–1166. DOI: 10.1289/ehp.1409065

23. Genotoxicity of afreshwater cyanotoxin, cylindrospermopsin, in two human cell lines: Caco-2 and HepaRG / E. Bazin, A. Mourot, A.R. Humpage, V. Fessard // Environ. Mol. Mutagen. – 2010. – Vol. 51, № 3. – P. 251–259. DOI: 10.1002/em.20539

24. Novak M., Hercog K., Žegura B. Assessment of the mutagenic and genotoxic activity of cyanobacterial toxin beta-N-methyl-amino-L-alanine in Salmonella typhimurium // Toxicon. – 2016. – Vol. 118. – P. 134–140. DOI: 10.1016/j.toxicon.2016.04.047

25. Cyanobacteria and Cyanotoxins Occurrence and Removal from Five High-Risk Conventional Treatment Drinking Water Plants / D.C. Szlag, J.L. Sinclair, B. Southwell, J.A. Westrick // Toxins (Basel). – 2015. – Vol. 7, № 6. – P. 2198–2220. DOI: 10.3390/toxins7062198

26. Using an online phycocyanin fluorescence probe for rapid monitoring of cyanobacteria in Macau freshwater reservoir / Y. Kong, I. Lou, Y. Zhang, C.U. Lou, K.M. Mok // Hydrobiologia. – 2014. – Vol. 741. – P. 33–49. DOI: 10.1007/s10750-013-1759-3

27. The human health effects of Florida Red Tide (FRT) blooms: an expanded analysis / P. Hoagland, D. Jin, A. Beet, B. Kirkpatrick, A. Reich, S. Ullmann, L.E. Fleming, G. Kirkpatrick // Environ. Int. – 2014. – Vol. 68. – P. 144–153. DOI: 10.1016/j.envint.2014.03.016

28. Cylindrospermopsin toxicity in mice following a 90-d oral exposure / N. Chernoff, D.J. Hill, I. Chorus, D.L. Diggs, H. Huang, D. King, J.R. Lang, T.-T. Le [et al.] // J. Toxicol. Environ. Health A. – 2018. – Vol. 81, № 13. – P. 549–566. DOI: 10.1080/15287394.2018.1460787

29. Four decades of progress in cylindrospermopsin research: The ins and outs of a potent cyanotoxin / Y. Yang, G. Yu, Y. Chen, N. Jia, R. Li // J. Hazard. Mater. – 2021. – Vol. 406. – P. 124653. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124653

30. Poniedziałek B., Rzymski P., Kokociński M. Cylindrospermopsin: water-linked potential threat to human health in Europe // Environ. Toxicol. Pharmacol. – 2012. – Vol. 34, № 3. – P. 651–660. DOI: 10.1016/j.etap.2012.08.005

31. Toxic potencies of metabolite (s) of non-cylindrospermopsin producing Cylindrospermopsis raciborskii isolated from temperate zone in human white cells / B. Poniedziałek, P. Rzymski, M. Kokociński, J. Karczewski // Chemosphere. – 2015. – Vol. 120. – P. 608–614. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.09.067

32. Acute effects of pure Cylindrospermopsin on the activity and transcription of antioxidant enzymes in Tilapia (Oreochromis niloticus) exposed by gavage / M. Puerto, S. Pichardo, Á. Jos, D. Gutiérrez-Praena, A.M. Cameán // Ecotoxicology. – 2011. – Vol. 20, № 8. – P. 1852–1860. DOI: 10.1007/s10646-011-0723-0

33. Cylindrospermopsin induced DNA damage and alteration in the expression of genes involved in the response to DNA damage, apoptosis and oxidative stress / B. Žegura, G. Gajski, A. Štraser, V. Garaj-Vrhovac // Toxicon. – 2011. – Vol. 58, № 6–7. – P. 471–479. DOI: 10.1016/j.toxicon.2011.08.005

34. Cylindrospermopsin induces neurotoxicity in tilapia fish (Oreochromis niloticus) exposed to Aphanizomenon ovalisporum / R. Guzmán-Guillén, I. Lomares, I.M. Moreno, A.I. Prieto, R. Moyano, A. Blanco, A.M. Cameán // Aquat. Toxicol. – 2015. – Vol. 161. – P. 17–24. DOI: 10.1016/j.aquatox.2015.01.024

35. DNA damage induced by cylindrospermopsin on different tissues of the biomonitor fish Poecilia reticulata / J.C.S. Rabelo, A.L. Hanusch, L.W.O. de Jesus, L.A. Mesquita, F.C. Franco, R.A. Silva, S.M.T. Sabóia-Morais // Environ. Toxicol. – 2021. – Vol. 36, № 6. – P. 1125–1134. DOI: 10.1002/tox.23111

36. Cytotoxicity and Effects on the Synapsis Induced by Pure Cylindrospermopsin in an E17 Embryonic Murine Primary Neuronal Culture in a Concentration- and Time-Dependent Manner / M.G. Hinojosa, A.I. Prieto, C. Muñoz-Castro, M.V. Sánchez-Mico, J. Vitorica, A.M. Cameán, Á. Jos // Toxins (Basel). – 2022. – Vol. 14, № 3. – P. 175. DOI: 10.3390/toxins14030175

Обоснование предельно допустимой концентрации цилиндроспермопсина в воде хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования для минимизации риска здоровью населения / О.О. Синицына, В.В. Турбинский, М.В. Пушкарева, Н.В. Кузь, М.А. Ширяева, Г.В. Масальцев, В.В. Сафандеев // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 2. – С. 16–29. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.02

UDC 613;614
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.02.eng

Read online

Research article

SUBSTANTIATING THE MAXIMUM PERMISSIBLE CONCENTRATION OF CYLINDROSPERMOPSIN IN WATER FOR DRINKING AND HOUSEHOLD USE TO MINIMIZE HUMAN HEALTH RISKS

O.O. Sinitsyna, V.V. Turbinsky, M.V. Pushkareva, N.V. Kuz, M.A. Shiryaeva, G.V. Masaltsev, V.V. Safandeev

Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, 2 Semashko St., Mytischi, Moscow region, 141014, Russian Federation

Increasing human-induced pollution of water objects, climate change, creation of reservoirs, and a decrease in water flow rates have accelerated saturation of water bodies with biogenic substances, which in turn has caused massive growth and spread of cyanobacteria. Intensification of "blooming" processes in water bodies is observed almost everywhere. In respect to human health hazards, the issue of massive growth of toxic cyanobacteria in surface water bodies used for drinking and recreational purposes is related to the possibility of various cyanotoxins forming in the water. This includes cylindrospermopsin (CYN), which is classified by the World Health Organization as a high-priority environmental pollutant, and this highlights high relevance of studying it. Assessing the experience gained by foreign researchers in studying the content of cyanobacteria in water bodies, it should be noted that there is a fairly wide species diversity of blue-green algae, depending on regional prevalence.

In many countries across the globe, the list of substances for drinking water quality control has been expanded to include not only the content of cyanobacteria metabolic products, but also, in some cases, the content of their specific species composition. A number of studies by foreign and Russian researchers have shown the need for timely measures aimed at raising drinking water safety by regulating metabolic products of cyanobacteria.

The aim of this study was to substantiate the maximum permissible concentration (MPC) of CYN content in water for household and drinking water use, as well as for recreational needs.

The study included analysis of the results obtained by research on the physicochemical properties and toxicity of CYN, as well as a subchronic experiment to investigate general toxic effects and specific ones including neurotoxic, embryotoxic, and teratogenic effects upon conditions intragastric administration to animals.

As a result, we established parameters of toxic effects produced by CYN and its hazard category and substantiated the MPC for the chemical in water equal to 1.0 µg/l, the sanitary-toxicological indicator of harm, and the hazard category.

Keywords: *cyanotoxins, cylindrospermopsin, general toxic effect, embryotoxic effect, teratogenic effect, drinking water, maximum permissible concentration.*

References

1. WHO. Guidelines for drinking-water quality, 4th ed. *WHO Documentation Centre*, 2011. Available at: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/44584/9789241548151_eng.pdf (January 11, 2025).

2. Bakaev A.V., Bakaeva E.N., Ignatova N.A. "Blooming" blue-green algae (cyanobacteria) a variety of emergency situations in reservoirs. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2012, vol. 23, no. 4–2, pp. 144 (in Russian).

© Sinitsyna O.O., Turbinsky V.V., Pushkareva M.V., Kuz N.V., Shiryaeva M.A., Masaltsev G.V., Safandeev V.V., 2025

Oxana O. Sinitsyna – Corresponding Member of RAS, Doctor of Medical Sciences, Professor, Deputy Director for Science (e-mail: sinitsyna.oo@fncg.ru; tel.: +7 (926) 447-08-74; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0241-0690).

Viktor V. Turbinsky – Doctor of Medical Sciences, Head of Water Hygiene Department (e-mail: turbinskii.vv@fncg.ru; tel.: +7 (920) 666-72-73; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7668-9324).

Mariya V. Pushkareva – Doctor of Medical Sciences, Professor, Chief Researcher of Water Hygiene Department (e-mail: pushkareva.mv@fncg.ru; tel.: +7 (912) 980-92-74; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5932-6350).

Nadezhda V. Kuz – Candidate of Medical Sciences, Leading Researcher of Water Hygiene Department (e-mail: nadetzhda.v.k@gmail.com; tel.: +7 (903) 284-14-74; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7573-0185).

Margarita A. Shiryaeva – Junior Researcher of Water Hygiene Department (e-mail: Shiryaeva.MA@fncg.ru; tel.: +7 (903) 161-14-04; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8019-1203).

Gleb V. Masaltsev – Candidate of Biological Sciences, Head of Toxicology Department (e-mail: masalcev.gv@fncg.ru; tel.: +7 (916) 424-94-81; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1539-1633).

Vitaly V. Safandeev – Candidate of Biological Sciences, Head of Inhalation Toxicology Department (e-mail: Visa.doc@mail.ru; tel.: +7 (929) 583-26-41; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0073-1677).

3. Kuz' N.V., Zholdakova Z.I. The problem of the «flowering» of the water sources. Evaluation of the influence of water processing on the content of cyanobacterium in drinking water of economic-drinking water supply of Moscow. *ZNiSO*, 2017, no. 9 (294), pp. 35–39 (in Russian).

4. Egorova N.A., Kuz N.V., Sinitsyna O.O. Materials for the substantiation of the hygienic standard of microcystin-LR in water of water objects. *Gigiena i sanitariya*, 2018, vol. 97, no. 11, pp. 1046–1052. DOI: 10.18821/0016-9900-2018-97-11-1046-52 (in Russian).

5. Kuz N.V., Sinitsyna O.O., Turbinsky V.V. Flowering of water sources – new challenges to drinking water safety in the condition of climate change. *Zdorov'e – osnova chelovecheskogo potentsiala: problemy i puti resheniya*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 218–225 (in Russian).

6. Sinitsyna O.O., Turbinskii V.V., Pushkareva M.V., Kuz N.V., Masaltsev G.V., Shiryaeva M.A., Ryashentseva T.M., Valtseva E.A., Vostrikova M.V. Morphofunctional changes in the animal organisms under oral exposure to anatoxin-a in subchronic experimental settings. *Toksikologicheskii vestnik*, 2024, vol. 32, no. 6, pp. 336–347. DOI: 10.47470/0869-7922-2024-6-336-347 (in Russian).

7. Turbinsky V.V., Bragina I.V., Kuz N.V., Sinitsyna O.O., Pushkareva M.V. The problem of algal bloom in the source of drinking water supply for the population. *Gigiena i sanitariya*, 2024, vol. 103, no. 12, pp. 1466–1472. DOI: 10.47470/0016-9900-2024-103-12-1466-1472 (in Russian).

8. Belyaeva N.N., Rakitskii V.N., Nikolaeva N.I., Vostrikova M.V., Veshchemova T.E. Quantitative structural and functional assessment of various systems of the body of laboratory animals in hygienic studies. *Gigiena i sanitariya*, 2020, vol. 99, no. 12, pp. 1438–1445. DOI: 10.47470/0016-9900-2020-99-12-1438-1445 (in Russian).

9. Falconer I.R. An overview of problems caused by toxic blue–green algae (cyanobacteria) in drinking and recreational water. *Environ. Toxicol.*, 1999, vol. 14, no. 1, pp. 5–12.

10. Falconer I.R. Toxic cyanobacterial bloom problems in Australian waters: risks and impacts on human health. *Phycologia*, 2001, vol. 40, no. 3, pp. 228–233. DOI: 10.2216/i0031-8884-40-3-228.1

11. Falconer I.R., Humpage A.R. Cyanobacterial (blue-green algal) toxins in water supplies: Cylindrospermopsins. *Environ. Toxicol.*, 2006, vol. 21, no. 4, pp. 299–304. DOI: 10.1002/tox.20194

12. Seawright J. Testing for necessary and/or sufficient causation: Which cases are relevant? *Political Analysis*, 2002, vol. 10, no. 2, pp. 178–193. DOI: 10.1093/pan/10.2.178

13. Norris R.L., Seawright A.A., Shaw G.R., Smith M.J., Chiswell R.K., Moore M.R. Distribution of 14C cylindrospermopsin in vivo in the mouse. *Environ. Toxicol.*, 2001, vol. 16, no. 6, pp. 498–505.

14. Cordeiro-Araújo M.K., Bittencourt-Oliveira M.C. Active release of microcystins controlled by an endogenous rhythm in the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. *Phycological Research*, 2013, vol. 61, no. 1, pp. 1–6.

15. Reisner A.D. The common factors, empirically validated treatments, and recovery models of therapeutic change. *Psychol. Rec.*, 2005, vol. 55, pp. 377–399. DOI: 10.1007/BF03395517

16. Shaw G.R., Seawright A.A., Moore M.R., Lam P.K. Cylindrospermopsin, a cyanobacterial alkaloid: evaluation of its toxicologic activity. *Ther. Drug Monit.*, 2000, vol. 22, no. 1, pp. 89–92. DOI: 10.1097/00007691-200002000-00019

17. Humpage A.R., Falconer I.R. Oral toxicity of the cyanobacterial toxin cylindrospermopsin in male Swiss albino mice: determination of no observed adverse effect level for deriving a drinking water guideline value. *Environ. Toxicol.*, 2003, vol. 18, no. 2, pp. 94–103. DOI: 10.1002/tox.10104

18. Sukenik A., Reisner M., Carmeli S., Werman M. Oral toxicity of the cyanobacterial toxin cylindrospermopsin in mice: Long-term exposure to low doses. *Environ. Toxicol.*, 2006, vol. 21, no. 6, pp. 575–582. DOI: 10.1002/tox.20220

19. Chernoff N., Hill D.J., Diggs D.L., Faison B.D., Francis B.M., Lang J.R., Larue M.M., Le T.-T. [et al.]. A critical review of the postulated role of the non-essential amino acid, β-N-methylamino-L-alanine, in neurodegenerative disease in humans. *J. Toxicol. Environ. Health B Crit. Rev.*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 1–47. DOI: 10.1080/10937404.2017.1297592

20. Merel S., Walker D., Chicana R., Snyder S., Baures E., Thomas O. State of knowledge and concerns on cyanobacterial blooms and cyanotoxins. *Environ. Int.*, 2013, vol. 59, pp. 303–327. DOI: 10.1016/j.envint.2013.06.013

21. Karlsson O., Roman E., Berg A.L., Brittebo E.B. Early hippocampal cell death, and late learning and memory deficits in rats exposed to the environmental toxin BMAA (beta-N-methylamino-L-alanine) during the neonatal period. *Behav. Brain Res.*, 2011, vol. 219, no. 2, pp. 310–320. DOI: 10.1016/j.bbr.2011.01.056

22. Geh E.N., Ghosh D., McKell M., de la Cruz A.A., Stelma G., Bernstein J.A. Identification of Microcystis aeruginosa Peptides Responsible for Allergic Sensitization and Characterization of Functional Interactions between Cyanobacterial Toxins and Immunogenic Peptides. *Environ. Health Perspect.*, 2015, vol. 123, no. 11, pp. 1159–1166. DOI: 10.1289/ehp.1409065

23. Bazin E., Mourot A., Humpage A.R., Fessard V. Genotoxicity of afreshwater cyanotoxin, cylindrospermopsin, in two human cell lines: Caco-2 and HepaRG. *Environ. Mol. Mutagen.*, 2010, vol. 51, no. 3, pp. 251–259. DOI: 10.1002/em.20539

24. Novak M., Hercog K., Žegura B. Assessment of the mutagenic and genotoxic activity of cyanobacterial toxin beta-N-methyl-amino-L-alanine in Salmonella typhimurium. *Toxicon*, 2016, vol. 118, pp. 134–140. DOI: 10.1016/j.toxicon.2016.04.047

25. Szlag D.C., Sinclair J.L., Southwell B., Westrick J.A. Cyanobacteria and Cyanotoxins Occurrence and Removal from Five High-Risk Conventional Treatment Drinking Water Plants. *Toxins (Basel)*, 2015, vol. 7, no. 6, pp. 2198–2220. DOI: 10.3390/toxins7062198

26. Kong Y., Lou I., Zhang Y., Lou C.U., Mok K.M. Using an online phycocyanin fluorescence probe for rapid monitoring of cyanobacteria in Macau freshwater reservoir. *Hydrobiologia*, vol. 741, pp. 33–49. DOI: 10.1007/s10750-013-1759-3

27. Hoagland P., Jin D., Beet A., Kirkpatrick B., Reich A., Ullmann S., Fleming L.E., Kirkpatrick G. The human health effects of Florida Red Tide (FRT) blooms: an expanded analysis. *Environ. Int.*, 2014, vol. 68, pp. 144–153. DOI: 10.1016/j.envint.2014.03.016

28. Chernoff N., Hill D.J., Chorus I., Diggs D.L., Huang H., King D., Lang J.R., Le T.-T. [et al.]. Cylindrospermopsin toxicity in mice following a 90-d oral exposure. *J. Toxicol. Environ. Health A*, 2018, vol. 81, no. 13, pp. 549–566. DOI: 10.1080/15287394.2018.1460787

29. Yang Y., Yu G., Chen Y., Jia N., Li R. Four decades of progress in cylindrospermopsin research: The ins and outs of a potent cyanotoxin. *J. Hazard. Mater.*, 2021, vol. 406, pp. 124653. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124653

30. Poniedziałek B., Rzymski P., Kokociński M. Cylindrospermopsin: water-linked potential threat to human health in Europe. *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, 2012, vol. 34, no. 3, pp. 651–660. DOI: 10.1016/j.etap.2012.08.005

31. Poniedziałek B., Rzymski P., Kokociński M., Karczewski J. Toxic potencies of metabolite(s) of non-cylindrospermopsin producing Cylindrospermopsis raciborskii isolated from temperate zone in human white cells. *Chemosphere*, 2015, vol. 120, pp. 608–614. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.09.067

32. Puerto M., Pichardo S., Jos Á., Gutiérrez-Praena D., Cameán A.M. Acute effects of pure Cylindrospermopsin on the activity and transcription of antioxidant enzymes in Tilapia (Oreochromis niloticus) exposed by gavage. *Ecotoxicology*, 2011, vol. 20, no. 8, pp. 1852–1860. DOI: 10.1007/s10646-011-0723-0

33. Žegura B., Gajski G., Štraser A., Garaj-Vrhovac V. Cylindrospermopsin induced DNA damage and alteration in the expression of genes involved in the response to DNA damage, apoptosis and oxidative stress. *Toxicon*, 2011, vol. 58, no. 6–7, pp. 471–479. DOI: 10.1016/j.toxicon.2011.08.005

34. Guzmán-Guillén R., Lomares I., Moreno I.M., Prieto A.I., Moyano R., Blanco A., Cameán A.M. Cylindrospermopsin induces neurotoxicity in tilapia fish (Oreochromis niloticus) exposed to Aphanizomenon ovalisporum. *Aquat. Toxicol.*, 2015, vol. 161, pp. 17–24. DOI: 10.1016/j.aquatox.2015.01.024

35. Rabelo J.C.S., Hanusch A.L., de Jesus L.W.O., Mesquita L.A., Franco F.C., Silva R.A., Sabóia-Morais S.M.T. DNA damage induced by cylindrospermopsin on different tissues of the biomonitor fish Poecilia reticulate. *Environ. Toxicol.*, 2021, vol. 36, no. 6, pp. 1125–1134. DOI: 10.1002/tox.23111

36. Hinojosa M.G., Prieto A.I., Muñoz-Castro C., Sánchez-Mico M.V., Vitorica J., Cameán A.M., Jos Á. Cytotoxicity and Effects on the Synapsis Induced by Pure Cylindrospermopsin in an E17 Embryonic Murine Primary Neuronal Culture in a Concentration- and Time-Dependent Manner. *Toxins (Basel)*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 175. DOI: 10.3390/toxins14030175

Sinitsyna O.O., Turbinsky V.V., Pushkareva M.V., Kuz N.V., Shiryaeva M.A., Masaltsev G.V., Safandeev V.V. Substantiating the maximum permissible concentration of cylindrospermopsin in water for drinking and household use to minimize human health risks. Health Risk Analysis, 2025, no. 2, pp. 16–29. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.02.eng

Получена: 10.04.2025
Одобрена: 29.04.2025
Принята к публикации: 14.06.2025

УДК 612.014.43
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.03

Читать онлайн

Научная статья

РИСКИ СМЕРТИ, СВЯЗАННЫЕ С ТЕМПЕРАТУРАМИ: ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ В РЕГИОНАХ РОССИИ В 2004–2019 ГГ.

М.Р. Максименко

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), Российская Федерация, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 11

В условиях климатических изменений и усиления теплового стресса возрастает необходимость изучения зависимости смерти от температур воздуха. Для проведения таких исследований необходимы многолетние временные ряды агрегированных оценок температур. Для большей части стран мира существует два основных типа источников данных о температурах: наземные метеорологические наблюдения и растровые данные. Первые более точно отражают местную специфику, не всегда обеспечивают полное покрытие территории. Растровые данные позволяют охватить всю территорию, но не всегда учитывают локальные микроклиматические особенности. В данной работе проводится сравнение этих источников данных для анализа ассоциации смертности с температурой на примере регионов России.

Для оценки зависимости «доза – эффект» использовалась двухуровневая модель. На первом уровне зависимости смертности от температур по регионам рассчитаны при помощи модели с распределенными лагами. На втором уровне обобщенные оценки получены при помощи метарегрессии со случайными эффектами.

Зависимость смертности от температур в России демонстрирует типичную форму J-образной кривой с более высокими рисками, связанными с холодом. При этом при использовании растровых данных смертность, связанная с жарой, была выше, чем на основе данных метеорологических наблюдений. Как правило, температуры с минимальными рисками смерти находятся между 15 и 20 °C, причем в более теплых регионах эти значения оказывались выше.

Полученные результаты показывают общую сопоставимость растровых и точечных данных для анализа смертности. Тем не менее в ряде регионов, в первую очередь в крупных и малонаселенных, в силу различных причин наблюдались расхождения в оценках.

Ключевые слова: *изменение климата, атмосферный реанализ, температура воздуха, температурный стресс, растровые данные, наземные метеорологические наблюдения, смертность населения, регионы РФ.*

Климатические изменения приводят к увеличению частоты и интенсивности волн жары, периодов устойчиво высоких температур, во время которых непропорционально быстро растут риски смерти, в особенности наиболее уязвимых групп населения [1]. Причем некоторые исследования указывают, что потенциальное снижение аналогичных рисков, связанных с холодом, может не компенсировать растущую смертность, связанную с жарой [2]. В частности, прогнозируется, что в Европе, даже с учетом адаптации населения, число смертей, ассоциированных с температурами, вырастет практически повсеместно [3]. В связи с этим изучение влияния температур на здоровье и смертность населения становится все более актуальным и требует более детального анализа.

В наибольшей степени изучена взаимосвязь рисков смерти под воздействием экстремально высоких температур. За счет того, что резкие всплески смертности в периоды жары всегда представляли серьезную проблему для общественного здравоохранения, они на протяжении значительного времени изучались в рамках эпидемиологических исследований [4]. Накопленные данные свидетельствуют о значительном влиянии волн жары на риски для здоровья, в том числе связанные с болезнями системы кровообращения и органов дыхания [5–7]. Также во время волн жары в связи с лесными пожарами, застаиванием воздушных масс, появлением «островов жары» и другими факторами существенно растет концентрация загрязняющих веществ в атмосфере, что является дополнительным фактором риска [8, 9].

В то же время избыточная смертность в холодный период остается значительно менее исследованной, а существующие данные о причинно-следственных связях и физиологических механизмах имеют более ограниченную доказательную базу

© Максименко М.Р., 2025

Максименко Михаил Романович – младший научный сотрудник (e-mail: mikemaksimenko@gmail.com; тел.: 8 (915) 476-60-68; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8441-6676).

[10]. Тем не менее эпидемиологические исследования демонстрируют, что именно риски, связанные с холодом, вносят наибольший вклад в общее бремя смертности, ассоциированной с температурами [11].

Особенную методологическую сложность представляет точная оценка того температурного стресса, который человек воспринимает. Это связано с тем, что влияние температур в значительной мере зависит от целого ряда сопутствующих факторов: влажности, скорости ветра, атмосферного давления и др. [12]. Для учета этих показателей зачастую применяются различные биометеорологические индексы, расчет которых строится на комбинации этих параметров с температурами для оценки интегрального значения теплового стресса [13–15]. Тем не менее в большинстве случаев основные результаты оказываются схожими и при использовании среднесуточных температур воздуха для прогнозирования рисков избыточной смертности [12].

Российский опыт исследований смертности, ассоциированной с температурами, основывается, как правило, на работах, посвященных различным городам России. Первые работы были сосредоточены на анализе рисков, вызванных холодом, и особенностях адаптации населения к низким температурам[1]. Однако систематические эпидемиологические исследования начали проводиться только в середине 2000-х гг. [16–18]. В этих работах выявлен статистически значимый прирост смертности в отдельных группах во время волн жары в 1999 и 2001 гг., а также волны холода в 2006 г.

В частности, имеются свидетельства о смертности во время волн жары и холода на юге [19–21], севере [7, 14, 22], северо-западе [23], в Сибири [24] и на Дальнем Востоке [25, 26], в Москве [9].

Значительная часть работ фокусируется на оценке избыточной смертности во время волн жары или холода по возрасту и причине смерти или на построении ассоциации температур с рисками смерти в рамках отдельных городов. Также проводились сравнения различных биометеорологических индексов как предикторов смертности [14, 21]. Отдельное внимание уделялось взаимодействию температур с загрязнением воздуха как дополнительному фактору риска [9]. Кроме того, рассматривалось влияние продолжительности волн жары и холода на уровень смертности [20].

Общие выводы исследований свидетельствуют об избыточной смертности как во время волн жары, так и во время волн холода, однако конкретные уровни риска зависят от географических особенностей, исследуемых групп населения, критериев температурных волн, методологических параметров и др. Например, на примере Волгограда, Ростова-на-Дону и Астрахани было показано, что риски смерти во время жары превышают аналогичные риски во время волн холода [19, 20]. Напротив, в Мурманске, Архангельске и Магадане риски, связанные с холодом, оказались выше [7]. В исследованиях на примере Хабаровска и Красноярска было установлено, что население обоих городов испытывает избыточную смертность как во время волн жары, так и во время волн холода. При этом для Хабаровска более высокие риски смерти наблюдались в жару [26], тогда как для Красноярска – во время волн холода [24].

Работ, посвященных оценке влияния температур на смертность на региональном уровне, сравнительно немного [27–29]. В них риски, связанные с холодом, в целом оказываются выше, однако анализ осложняется широкими доверительными интервалами оценок.

Подходы к анализу данных в экологической эпидемиологии. Информация о состоянии окружающей среды (температуры, загрязнения воздуха и др.) представлена данными наземных наблюдений и растровыми данными. Наземные наблюдения обеспечивают высокую точность данных непосредственно в точках измерения, благодаря чему часто рассматриваются как «золотой стандарт». Однако они не могут обеспечить полного географического покрытия. Кроме того, зачастую станции (в особенности метеорологические) располагаются в нетипичных местах: аэропортах, периферийных районах крупных городов, что снижает их применимость для оценок факторов риска в местах проживания людей [30, 31].

Растровые данные о температурах формируются на основе дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) либо интерполяции и различных геостатистических методах. Этот подход обеспечивает сплошное покрытие всей изучаемой территории. Однако ошибки измерений, расчетов и агрегирования ограничивают их точность и применимость как источника сведений о состоянии окружающей среды [32]. Глобальные растровые продукты, обладая сравнимой детализацией во времени, зачастую имеют слишком низкое пространственное разрешение и отражают реальные условия лишь в усредненном виде, без учета локальных паттернов [33], и оказываются доступными лишь с определенным лагом. А наборы растровых данных со сверхвысоким разрешением из-за ограниченного охвата не позволяют проводить анализ в пределах больших по площади регионов.

Одним из источников растровых данных о температурах, используемых в экологической эпидемиологии, являются атмосферные реанализы. Они основываются на данных ДЗЗ, наземных метеорологических наблюдениях и моделях циркуляции атмосферы, что позволяет создавать непрерывные вре-

[1] Winter mortality and cold stress in Yekaterinburg, Russia: interview survey / G.C. Donaldson, V.E. Tchernjavskii, S.P. Ermakov, K. Bucher, W.R. Keatinge // BMJ. – 1998. – Vol. 316, № 7130. – P. 514–518. DOI: 10.1136/bmj.316.7130.514; Cold related mortalities and protection against cold in Yakutsk, eastern Siberia: observation and interview study / G.C. Donaldson, S.P. Ermakov, Y.M. Komarov, C.P. McDonald, W.R. Keatinge // BMJ. – 1998. – Vol. 317, № 7164. – P. 978–982. DOI: 10.1136/bmj.317.7164.978

менные ряды и составлять ретроспективные прогнозы. Однако, поскольку они представляют собой модельные расчеты, часто они неспособны учесть локальные погодные условия [34]. Тем не менее многочисленные исследования указывают на их взаимную сопоставимость с другими источниками данных для анализа смертности [35, 36].

Дополнительные сложности связаны с расчетом агрегированного уровня температур в пределах определенной территории, так как выбор конкретного метода расчета может оказаться столь же критичным, как и выбор того или иного источника данных [37]. Наиболее простым и интуитивно понятным методом агрегирования является усреднение всех имеющихся значений [38]. Однако зачастую такие оценки оказываются нерепрезентативными. Например, ситуацию в приграничных районах могут гораздо точнее отражать наблюдения в соседних регионах, из-за чего иногда стоит расширить выборку метеостанций за счет буферной зоны. Усреднение также не позволяет учесть различия, связанные с неоднородностью расселения. Для этого возможно учитывать каждую метеостанцию с весом, обратно пропорциональным ее расстоянию до центра региона. В этом случае наиболее репрезентативной центральной точкой, отражающей особенности расселения, является центр населенности. Центр населенности региона – это точка, расстояние от которой до всех остальных точек внутри региона с учетом их весов по численности населения будет наименьшим.

При использовании растровых данных для агрегированной оценки теплового стресса возникает аналогичная проблема учета неравномерности расселения [39]. Для решения этой проблемы дополнительно используют растровые поверхности плотности населения. Взвешенные по численности населения значения температур намного более точны в качестве агрегированных оценок теплового стресса.

В российской практике большинство исследований смертности, связанных с температурами, проводилось на уровне отдельных городов, поэтому в качестве данных о температурах обычно использовались измерения с наземных станций [40]. Как правило, вне Москвы информация о температурах доступна лишь на основе сети станций Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромета), данными которой и пользовалось большинство исследователей. При этом вследствие анализа в пределах отдельных городов проблем агрегирования и усреднения данных в работах не возникало. Исследований, посвященных изменению смертности в результате колебания температур на региональном уровне, намного меньше, и в них, как правило, также используются точечные данные с наземных станций [28, 29]. Растровые данные и данные реанализов для изучения смертности, связанной с температурами, пока используются достаточно редко, хотя и представляют значительный потенциал для анализа в силу возможности полного покрытия территории.

В настоящей работе предполагается провести региональные оценки рисков смерти, связанных с температурами воздуха, рассчитанных на основе двух источников данных: точечных наземных наблюдений и растровых данных реанализа. Предполагается, что существенных различий между двумя источниками данных не будет, однако наибольшие расхождения будут наблюдаться для рисков, связанных с жарой.

Материалы и методы. Исследование охватывает период 2004–2019 гг., характеризующийся устойчивой тенденцией снижения смертности в России в целом. Анализ включал 80 регионов РФ с непрерывными временными рядами данных. Из рассмотрения были исключены Республика Крым и г. Севастополь, данные для которых доступны лишь с 2015 г. Кроме того, Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа были включены в состав Тюменской области, а Ненецкий автономный округ – в состав Архангельской области.

Все сведения о смертности и усредненных значениях температур в регионах были агрегированы на уровне недель. Хотя дневные ряды способны отразить влияние краткосрочных эффектов более точно, использование недельных данных демонстрирует сопоставимые по качеству и репрезентативности результаты [41].

В качестве основного источника демографических данных использовалась Российская база данных краткосрочных колебаний смертности (РосБКС), содержащая понедельную статистику о смертности по регионам РФ за 2000–2021 гг.[2] База данных основана на деперсонифицированных микроданных Росстата, агрегированных по регионам на уровне недель[3]. В качестве исследуемого показателя использовались еженедельные стандартизованные коэффициенты смертности (СКС) с использованием Европейского стандарта населения 2013 г.[4], из-за чего влияние эффектов возрастной структуры на оценки отношения смертности и температур было исключено [42]. Для оценки среднегодовой численности населения использовались данные Российской базы данных по рождаемости и смертности (РосБРиС), рассчитанные на основе данных Росстата, разработанной Центром

[2] Российская база данных краткосрочных колебаний смертности [Электронный ресурс] // Международная лаборатория исследований населения и здоровья НИУ ВШЭ. – URL: https://demogr.hse.ru/russtmf (дата обращения: 17.04.2025).

[3] За исключением 9–13 недель 2012 г. в Псковской области.

[4] Eurostat. Revision of the European Standard Population. Report of Eurostat's task force: 2013 edition // Publications Office of the European Union. DOI: 10.2785/11470

демографических исследований Российской экономической школы (ЦДИ РЭШ)[5]. Данные о численности населения использовались без пересчета с учетом итогов переписи 2021 г.

Для оценки рисков, связанных с тепловым стрессом, для каждого региона в разрезе недель были рассчитаны средние температуры воздуха с использованием двух источников данных: измерений наземных метеорологических станций и растровых данных атмосферного реанализа.

В качестве источников точечных данных использовались недельные средние температуры воздуха, рассчитанные на основе данных наземных метеостанций из базы «Аисори-М», предоставляемой Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрометеорологической информации – Мировым центром данных (ВНИИГМИ-МЦД)[6]. Этот массив включает срочные метеорологические наблюдения с 600 станций, охватывающих территорию России и некоторых стран постсоветского пространства. Так как не для всех метеопостов имелись непрерывные ряды данных и не все из них располагались вблизи границ России, в общей сложности в анализ была включена 571 станция. Кроме того, база «Аисори-М» содержит справочник с описанием возможных изменений в методике измерений для каждой станции, а также их географические координаты, которые использовались для последующих расчетов.

Растровые данные были получены из атмосферного реанализа EAC4 (ECMWF Atmospheric Composition Reanalysis 4), который проводится Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) на глобальном уровне [43]. Реанализ EAC4 имеет пространственное разрешение 0,75 на 0,75° и доступен на сайте Copernicus Atmosphere Data Store[7]. Данные реанализа начали публиковаться с 2003 г. и продолжают обновляться два раза в год, предоставляя данные с задержкой в несколько месяцев. Помимо этого, в EAC4 публикуются сведения о других метеорологических параметрах, а также о концентрации различных веществ в атмосфере. Исходное временное разрешение данных составляет 3 ч, но для анализа они были агрегированы по неделям.

Для учета неравномерного расселения внутри исследуемых территориальных единиц использовались растровые данные из Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4), одного из наиболее активно используемого источника сведений о численности населения для составления региональных оценок тех или иных площадных показателей. Этот массив данных предоставляется NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC)[8] и имеет пространственное разрешение 0,5 на 0,5° [9]. GPWv4 основан на официальной демографической статистике, в частности, для России используется муниципальный уровень анализа. Дополнительно в GPWv4 учитываются особенности земной поверхности, за счет чего плотность населения лучше соответствует реальному расселению. В качестве источника был взят набор данных GPWv4 за 2010 г., отражающий плотность населения на середину исследуемого периода.

Для оценки агрегированных по регионам средних недельных температур использовались три подхода, два из которых основывались на данных метеостанций. Для первого метода центр населенности определялся для каждого региона на основе данных о плотности населения из GPWv4. Затем всем метеорологическим станциям, расположенным внутри региона и в пределах двухсоткилометровой (в соответствии с [29]) буферной зоны вокруг него, были присвоены веса, обратно пропорциональные их расстоянию до регионального центра населенности. Средние недельные температуры рассчитывались как взвешенная сумма температур по всем выбранным метеостанциям.

Помимо этого, для дополнительной верификации оценок средние недельные температуры по регионам на основе наземных наблюдений были рассчитаны альтернативным способом. Он строился на оценке недельных температур на уровне муниципалитетов. Аналогично для каждого муниципалитета определялся центр населенности, выбирались метеостанции в пределах соответствующей буферной зоны и присваивались веса в соответствии с их удаленностью от центра муниципалитета. После этого средняя температура по региону рассчитывалась как средневзвешенная температура по муниципалитетам, где веса определялись на основе численности населения каждой территориальной единицы.

Для расчета средних температур на основе растровых данных были использованы усредненные по неделям изображения из реанализа EAC4. Эти данные были приведены к пространственному разрешению растра плотности населения для обеспечения

---

[5] Центр демографических исследований [Электронный ресурс] // Российская экономическая школа (РЭШ). – URL: https://www.nes.ru/demogr/ (дата обращения: 17.04.2025).

[6] Аисори-М: Специализированные массивы для климатических исследований [Электронный ресурс]. – URL: http://aisori-m.meteo.ru (дата обращения: 14.04.2025).

[7] Atmosphere Data Store [Электронный ресурс]. – URL: https://ads.atmosphere.copernicus.eu (дата обращения: 14.04.2025).

[8] Gridded Population of the World (GPW), v4 [Электронный ресурс] // Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). – URL: https://beta.sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/gpw-v4-population-density-rev10 (дата обращения: 17.04.2025).

[9] Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density Adjusted to Match 2015 Revision UN WPP Country Totals, Revision 11 // Center for International Earth Science Information Network, Columbia University (CIESIN). – 2018.

взаимной сопоставимости. Таким образом, средние значения температур в каждом регионе были рассчитаны как средние значения температур в соответствующих ячейках растра, взвешенные на число жителей, проживающих в пределах каждой ячейки.

Для оценки зависимости рисков смерти от температур была использована двухуровневная модель с квазипуассоновской регрессией для каждого региона на первом уровне и метаанализом региональных оценок для получения обобщенных результатов на втором уровне. В частности, на первом этапе для каждого региона при помощи модели с распределенными лагами (DLM) регионов [44] строится кривая «доза – эффект» влияния температур на смертность с учетом отложенных эффектов влияния температур. Затем эти региональные оценки агрегируются для расчета данной зависимости в целом для России и последующей поправки региональных результатов на эти цифры.

Кривая «доза – эффект» в данном контексте отражает оценки относительных рисков смерти (Relative Risks, RR) всех наблюдаемых температур. Так как она обладает нелинейной формой, как правило, ее представляют в качестве непараметрических функций. В качестве референтного уровня, относительно которого рассчитывались все риски, связанные с температурами, использовалась температура минимальной смертности (ТМС). Таким образом, минимальный уровень относительного риска смерти был равен единице [45]. Более детально эта методология описана в работе [46]. Анализ временных рядов был проведен с помощью квазипуассоновской регрессии, формула которой может быть представлена как:

$$\log\left(E\left(Y_{week}\right)\right) = \\ = intercept + ns\left(week,\ df = 7\ per\ year\right) + \\ + cb\left(ns\left(T,\ knots = 3\right), lag = 0,1,2,3\right) + \\ + offset\left(\log\left(Pop\right)\right),$$

где $E\left(Y_{week}\right)$ – ожидаемое значение недельного СКС в регионе;

$intercept$ – свободный член уравнения, отражающий средний уровень СКС в регионе;

$ns\left(week,\ df = 7\ per\ year\right)$ – натуральный кубический сплайн с 7 степенями свободы для каждого года наблюдения, который был включен для учета сезонности и долгосрочных трендов смертности.

Модель $cb(ns\left(T,\ knots = 3\right), lag = 0,1,2,3)$ представляет собой модель с распределенными лагами (DLM), которая используется для учета влияния температур на риски смерти с учетом отложенных эффектов.

Кривая «доза – эффект», отражающая ассоциацию рисков смерти с температурами, моделировалась при помощи натурального кубического сплайна с тремя узлами, расположенными равномерно на 25, 50 и 75 процентилях распределения температур каждого региона. Этот подход позволяет наиболее точно отражать нелинейные отношения между температурой и смертностью и является распространенным при проведении подобных исследований. Для учета структуры лагов использовались категориальные переменные. Таким образом, влияние температуры на смертность оценивалось не только в текущий момент, но и с учетом их воздействия за три предшествующие недели.

Параметр $offset\left(\log\left(Pop\right)\right)$ в библиотеке glm языка программирования R используется при применении коэффициентов смертности в качестве зависимой переменной, так как в пуассоновской и квазипуассоновской регрессиях требуется производить анализ счетных данных. Поэтому логарифм средней численности населения за соответствующий период в качестве дополнительного параметра модели обеспечивал сопоставимость оценок смертности между собой в разных регионах.

Выбор оптимальных параметров сплайна, длины и структуры лагов в моделировании кривых «доза – эффект» строился на минимизации информационного критерия Акаике (AIC).

Для получения агрегированных оценок рисков, связанных с температурами, на основе региональных данных был проведен метаанализ региональных зависимостей «доза – эффект» [47, 48]. Данный подход позволяет объединить результаты из различных регионов, учитывая вариативность между ними за счет использования модели метарегрессии со случайными эффектами.

Агрегированная зависимость смертности от температур, рассчитанная для всей России на основе региональных оценок, в дальнейшем была использована для уточнения последних. Для этого применяются лучшие линейные несмещенные прогнозы (Best Linear Unbiased Predictors, BLUP), состоящие из двух компонентов. В первую очередь, они включают параметры кривых «доза – эффект», полученные для каждого региона на первом уровне анализа. Корректировка этих оценок на их отклонение от агрегированных результатов позволяет повысить точность региональных показателей. Данный компонент BLUP представляет собой случайные эффекты, уже полученные в результате использования метарегрессии [47]. Для представления региональных различий зависимости смертности от температур были показаны региональные вариации BLUP-оценок ТМС, рассчитанные на основе каждого из трех методов агрегирования данных по температурам.

Обработка данных и статистический анализ были произведены в среде RStudio. В частности, построения обобщенных кривых «доза – эффект» для анализа были использованы библиотеки glm, splines, dlnm, mvmeta и mixmeta [44].

Таблица 1

Описательные статистики временных рядов понедельных данных за 2004–2019 гг. в разрезе 80 регионов, используемых на первом уровне анализа для трех моделей, каждая из которых применяет температуры, рассчитанные различными способами

Показатель	1-й квартиль	Медиана	Среднее	3-й квартиль
Зависимая переменная				
Недельный СКС, на 1 тыс. чел.	17,20	19,50	20,08	22,40
Независимые переменные				
Средние недельные температуры на основе наземных станций по мун., °С	-3,509	5,600	4,728	15,067
Средние недельные температуры на основе наземных станций по рег., °С	-3,468	5,586	4,727	15,064
Средние недельные температуры на основе реанализа (EAC4), °С	-3,625	5,369	4,499	14,767

Примечание: источники – расчеты авторов на основе «РосБКС», «Аисори-М», EAC4.

Результаты и их обсуждение. Недельные показатели СКС в среднем за весь исследуемый период (2004–2019 гг.) оказались наибольшими в Чукотском АО (28,6 ‰), Республике Тыва (26,5 ‰), Еврейской АО (24,6 ‰) и Амурской области (24,1 ‰). Наименьшие значения наблюдались в Республике Ингушетия (11,6 ‰), Москве (13,4 ‰), Республике Дагестан (14,4 ‰), Санкт-Петербурге (15,7 ‰). На протяжении всего исследуемого периода смертность в России достаточно быстро снижалась: в 2005 г. средний понедельный СКС по всем регионам составил 25,2 ‰, к 2019 г. он сократился до 16,2 ‰. Необходимо отметить, что эти оценки основываются на средних значениях коэффициентов смертности по неделям, поэтому могут не всегда соответствовать годовым коэффициентам смертности в других источниках.

В течение рассматриваемого периода рекордно низкая средняя недельная температура воздуха была зафиксирована в конце декабря 2004 г. в Республике Саха (Якутия). Ее значения составили -43,15 °С при использовании данных наземных станций, -45,01 °С – при использовании средневзвешенного значения средних температур в муниципалитетах, и -44,66 °С – при использовании растровых данных реанализа. Средние недельные значения температур достигли максимума в Волгоградской области во время волны жары в августе 2010 г., характеризовавшейся пиковой смертностью в регионе, и составили 31,53; 32,18 и 32,34 °С для этих же источников данных соответственно. Рекордные значения как для экстремальной жары, так и для экстремального холода были зарегистрированы в один и тот же период при использовании этих источников данных, а количественные оценки оказались близкими.

Общее число недельных наблюдений за 2004–2019 гг. во всех регионах составило 66 640. Значения средних температур по регионам, полученные с помощью различных методов, демонстрируют высокую степень согласованности (табл. 1). Коэффициент корреляции между временными рядами температур, рассчитанный на основе данных с наземных станций, составил 0,991. Коэффициент корреляции между данными реанализа и агрегированными данными по регионам составил 0,969, а между данными реанализа и средневзвешенными значениями по муниципалитетам – 0,978.

На региональном уровне средние недельные значения температур, полученные тремя разными методами, демонстрируют не только тесную линейную связь друг с другом, но и отсутствие в большинстве регионов смещений, связанных с систематическими ошибками (рис. 1, 2). Хотя в целом для положительных температур оценки были более согласованными. Однако есть некоторые исключения, например, Чукотский АО, где получающиеся при использовании разных методов агрегирования данные метеостанций не согласуются. Региональные и муниципальные центры населенности в Чукотском АО не позволяют получить сопоставимую картину, из-за чего оценки при использовании разных методов не соответствуют друг другу. Аналогичные, хотя и менее выраженные, различия были отмечены в некоторых других регионах с низкой плотностью и неравномерным распределением населения, в частности, в Тюменской области, Красноярском крае и Республике Алтай.

Кривые «доза – эффект», демонстрирующие ассоциацию смертности с температурами, полученные для всей России на основе метарегрессии, демонстрируют схожую между собой форму, отвечающую наиболее распространенной зависимости смертности от температур. И холод, и жара приводят к повышению рисков смерти, причем для большинства регионов ТМС находится в пределах 15–20 °С, что соответствует выводам, полученным в большинстве других исследований [3]. Однако риски, связанные с экстремальным холодом, оказались статистически более значимыми.

Это противоречит результатам многих исследований, в которых наибольшие риски связывают с жарой [11], и может объясняться двумя факторами. Во-первых, в данном исследовании использовался достаточно длинный лаговый период (три недели), что лучше позволяет учитывать отсроченные эффекты холода. При рассмотрении ассоциации температур со смертностью в пределах недели без учета лагов риски, связанные с жарой, оказываются

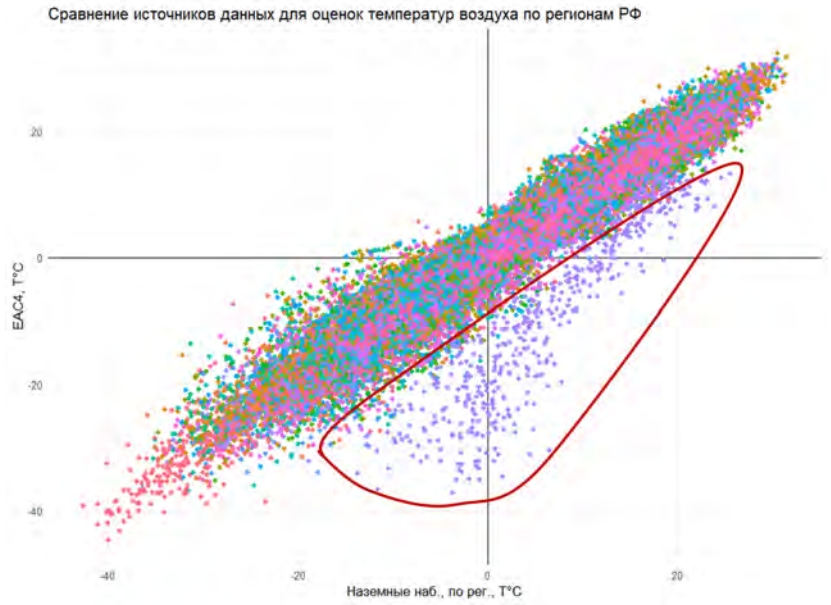


Рис. 1. Диаграмма рассеяния средних недельных оценок температур за 2004–2019 гг., полученных при помощи агрегирования точечных данных с учетом центров населенности регионов и взвешенных по плотности населения данных реанализа EAC4 (цветом показаны разные регионы РФ; красным выделены значения Чукотского АО; источники – расчеты авторов на основе «Аисори-М», EAC4)

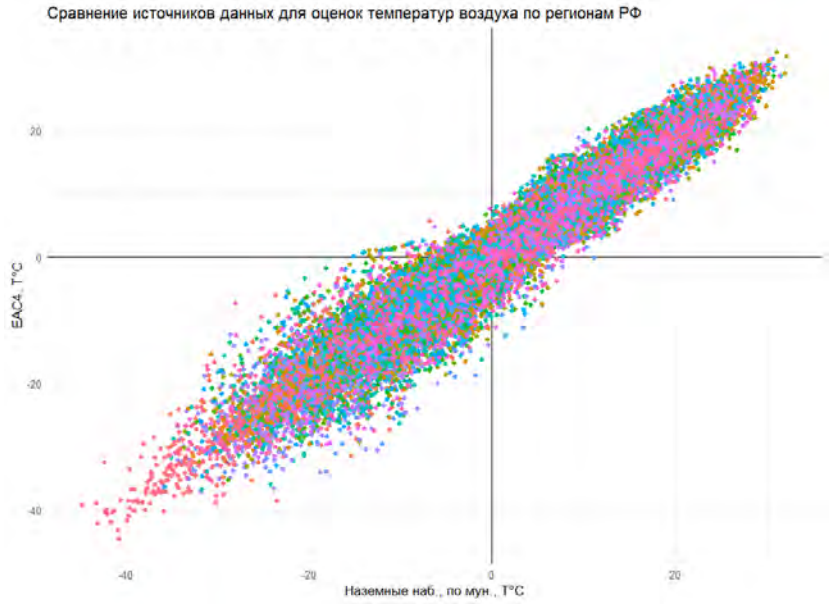


Рис. 2. Диаграмма рассеяния средних недельных оценок температур за 2004–2019 гг., полученных при помощи агрегирования точечных данных с учетом центров населенности муниципалитетов и взвешенных по плотности населения данных реанализа EAC4 (цветом показаны разные регионы РФ; источники – расчеты авторов на основе «Аисори-М», EAC4)

намного выше. Однако предсказательная способность такой модели на основе статистических критериев оказывается ниже. Во-вторых, полученные результаты согласуются с выводами других российских эпидемиологических исследований, где риски смерти во время волн холода часто бывают выше, чем во время волн жары[10] [22]. Так или иначе, но данная оценка представляет лишь усредненную картину, основывающуюся на обобщенных данных из разных регионов, условия в которых различаются достаточно сильно.

Обобщенная оценка температуры минимальной смертности составила 19,12 °C при использовании данных наземных станций, агрегированных по

[10] Winter mortality and cold stress in Yekaterinburg, Russia: interview survey / G.C. Donaldson, V.E. Tchernjavskii, S.P. Ermakov, K. Bucher, W.R. Keatinge // BMJ. – 1998. – Vol. 316, № 7130. – P. 514–518. DOI: 10.1136/bmj.316.7130.514

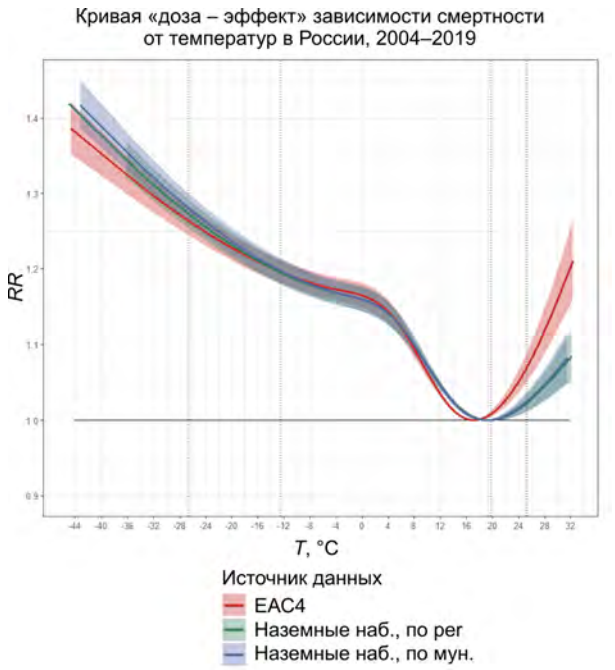


Рис. 3. Оценки рисков смерти, ассоциированных с температурами, рассчитанных разными способами: пунктирными линиями показаны 1-й, 10-й, 90-й и 99-й процентили распределения температур во всех регионах России на протяжении изучаемого периода (2004–2019 гг.) (источники – расчеты авторов на основе «РосБКС», «Аисори-М», ERA4)

регионам. Для средневзвешенных температур по муниципалитетам значение ТМС равнялось 19,34 °С, а для данных реанализа – 17,17 °С. В терминах многолетнего распределения температур ТМС соответствует процентилям: 88,4; 88,8 и 83,0. Относительно высокие значения процентилей объясняются особенностями климата России, в подавляющем большинстве регионов наблюдается продолжительный зимний период, не отмечающийся в других регионах, в которых проводились аналогичные работы [45, 49].

Формы кривых «доза – эффект», построенных на основе наземных наблюдений, очень похожи между собой для всего спектра наблюдаемых температур. Для данных, полученных на основе оценок по регионам, риски, связанные с экстремальными температурами, оказались немного выше, но это различие статистически незначимо. Более существенные несоответствия наблюдаются между данными, полученными на основе растровых данных и агрегированных наземных наблюдений. В особенности значительными они оказались для экстремально высоких температур (рис. 3).

Индикаторами рисков смерти в результате экстремальных температур могут служить точечные оценки относительных рисков при определенных граничных значениях, например 95-м или 99-м процентилях многолетнего распределения в случае эффектов, связанных с жарой [50]. Так, относительные риски смерти в результате экстремального холода на основе данных температурного реанализа оказались ниже, чем для данных с метеорологических станций.

Гораздо более значимым оказалось различие в рисках для верхних процентилей многолетнего распределения средних недельных температур. Относительные риски смерти для 99-го процентиля на основе данных метеостанций в модели с распределенными лагами составили примерно 1,02, в то время как для данных на основе растров – 1,07, и это различие оказалось статистически значимым (табл. 2). При этом важно отметить, что температуры, соответствующие этим процентилям, различались не слишком сильно.

В среднем по регионам значения BLUP (лучших линейных несмещенных) оценок ТМС, рассчитанных на основе наземных наблюдений, оказались на 2–3 °С выше, чем оценки, полученные с использованием растровых данных. В большинстве случаев расчеты на основе разных методов приводили к согласованным результатам. В пределах федеральных округов, как правило, более южные регионы с более высокими температурами демонстрировали более высокие значения ТМС (Белгородская область в ЦФО, Республика Калмыкия в ЮФО, Саратовская область в ПФО), однако отмечались и несоответствия, например, Республика Коми в СЗФО.

Взаимосвязей между средними значениями СКС и уровнями ТМС отмечено не было. Несмотря на то что регионы с более высоким уровнем смертности, как правило, находятся в более холодном климате, это не повлияло на итоговую региональную дифференциацию. В большинстве регионов ТМС соответствовали 75–85-му процентилям многолетнего распределения температур при использовании данных реанализа. Для оценок на основе данных метеорологических станций ТМС находились, как правило, между 80-м и 90-м процентилями. Значения ниже 70-го процентиля практически не отмечались, в то время как в некоторых регионах (Камчатский край, Сахалинская область, Республика Коми, Республика Тыва) они приближались к 99-му процентилю, что обусловлено как холодным климатом, так и недостаточной достоверностью BLUP-оценок в условиях небольшой численности населения.

Наибольшие расхождения между оценками ТМС, полученными различными методами, наблюдаются в некоторых малонаселенных регионах с низкой плотностью метеостанций, например, в Чукотском АО, где их репрезентативность для обобщенных региональных оценок температур оказывается ниже. В Центральном, Приволжском и Южном федеральных округах сеть метеостанций имеет более полное покрытие, а физико-географические характеристики не демонстрируют значительных различий, в связи с чем BLUP-оценки ТМС оказались наиболее согласованными между собой. Однако отдельные регионы, например, Республика Адыгея,

Таблица 2

Относительные риски, связанные с экстремальными температурами, рассчитанные разными способами, для 1-го, 5-го, 95-го и 99-го процентилей распределения температур во всех регионах России на протяжении изучаемого периода (2004–2019 гг.)

Метод агрегирования данных		1-й проц. к ТМС	5-й проц. к ТМС	95-й проц. к ТМС	99-й проц. к ТМС
На основе наземных станций по мун.	*T*, °C	-26,39	-17,65	21,8	25,43
	RR	1,272 (95 % *CI*: 1,253–1,291)	1,219 (95 % *CI*: 1,203–1,236)	1,004 (95 % *CI*: 1,000–1,008)	1,023 (95 % *CI*: 1,012–1,035)
На основе наземных станций по рег.	*T*, °C	-26,77	-17,63	21,74	25,31
	RR	1,282 (95 % *CI*: 1,262–1,302)	1,223 (95 % *CI*: 1,206–1,24)	1,005 (95 % *CI*: 1,001–1,009)	1,025 (95 % *CI*: 1,012–1,038)
На основе реанализа (EAC4)	*T*, °C	-26,62	-17,89	21,41	25,05
	RR	1,264 (95 % *CI*: 1,245–1,283)	1,218 (95 % *CI*: 1,202–1,235)	1,021 (95 % *CI*: 1,013–1,028)	1,066 (95 % *CI*: 1,048–1,085)

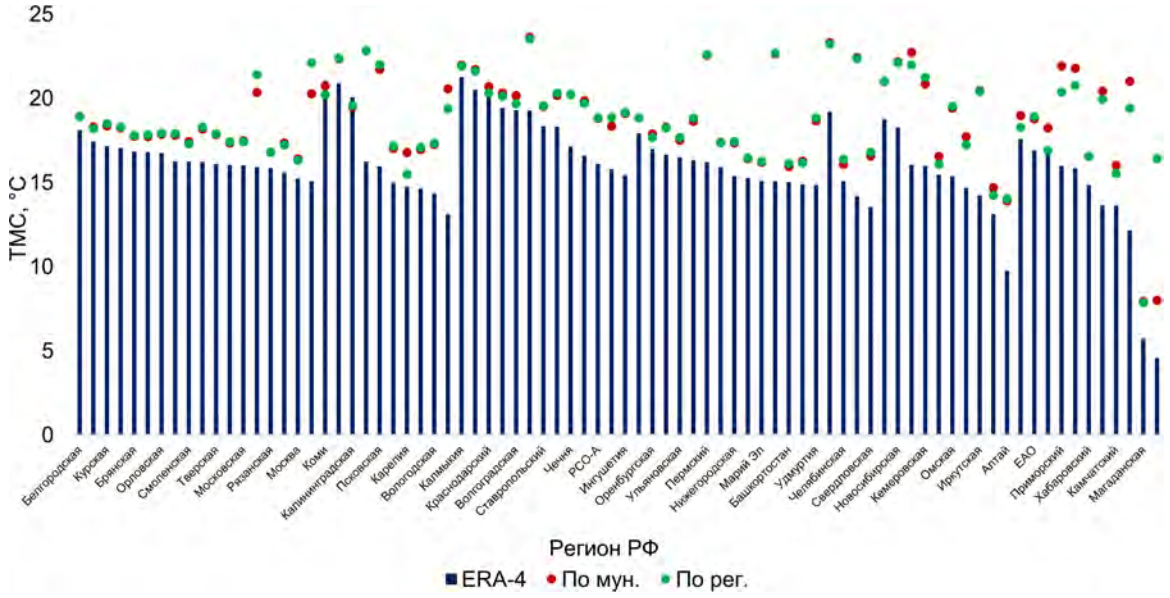


Рис. 4. BLUP-оценки ТМС для температур, рассчитанных разными способами, по регионам России за 2004–2019 гг. (источники – расчеты авторов на основе «РосБКС», «Аисори-М», EAC4)

Ивановская, Костромская, Архангельская области, Приморский край, Республика Якутия и Санкт-Петербург, демонстрируют аномальные разбросы в оценках ТМС между всеми тремя оценками, что может объясняться артефактами агрегации данных и недоучетом локальных климатических особенностей (рис. 4).

Полученные оценки зависимости смертности от температур имеют *J*-образную форму, где риски, связанные с холодом, преобладают. Эти данные позволяют рассчитать бремя температурного стресса и прогнозировать потери населения из-за изменения климата, а также разрабатывать региональные меры профилактики и противодействия негативным последствиям температур.

Опыт российских исследований не позволяет однозначно определить, какие риски (холода или жары) более значимы, так как выводы зависят от географического охвата и методологии [26]. Преобладание рисков, связанных с холодом, в данной работе может быть обусловлено использованием модели с распределенными лагами, учитывавшей влияние температур за три недели. Этот метод подходит для анализа годовой динамики, но занижает оценки при изучении смертности в результате волн жары [41]. Кроме того, недельные данные не учитывают краткосрочные эффекты высоких температур, которые проявляются в течение нескольких дней [44]. Это могло дополнительно способствовать недоучету смертности, ассоциированной с высокими температурами. Также важно учитывать, что анализировалась смертность от всех причин, включая внешние, которые играли существенную роль в начале исследуемого периода. Для многих внешних причин четкие зависимости от температур не установлены, что затрудняет выявление зависимостей на примере используемых данных.

Не выявлено значимой связи между исходными значениями СКС и температурными рисками. В регионах с высокой смертностью значительная

доля приходится на внешние причины и случаи, связанные с алкоголем, которые слабо зависят от температур. Поэтому общий уровень смертности существенно не повлиял на зависимость между температурой и смертностью.

Региональные различия в ТМС отражают природно-климатические особенности регионов. В более теплых регионах ТМС выше, что объясняется адаптацией населения к преобладающим условиям [49]. Аналогичные для большинства регионов России значения ТМС (15–18 °С) наблюдались в городах Финляндии, Швеции и Норвегии [45]. В соответствии с процентилями распределения температур, которым соответствуют ТМС, наилучшими являются оценки на основе реанализа. Как правило, в аналогичных климатических условиях процентили с минимальными рисками смерти также находятся между 75-м и 85-м процентилями [49]. Снижение ТМС с увеличением широты и уменьшением среднегодовых температур отражает различия в адаптационном потенциале населения России.

В отдельных регионах, например, в Магаданской области или в Чукотском АО, отмечались аномально низкие значения ТМС, что может быть связано с большими разбросами данных и низкой достоверностью модели. Напротив, в Камчатском крае, Республике Коми и Забайкальском крае ТМС оказались завышенными, близкими к максимальным процентилям. В случае использования наблюдений метеостанций это может быть связано с недостаточным качеством исходных данных и особенностями BLUP-оценок.

В данном исследовании оценки рисков смерти, связанных с температурами, на уровне регионов, полученные разными методами, оказались схожими, что согласуется с результатами других работ [15, 30, 50–53]. Кроме того, даже достаточно крупный уровень агрегирования как во временном (по неделям), так и в пространственном (по регионам РФ) разрезах в целом не повлиял на сопоставимость оценок.

Дополнительной сложностью служило неравномерное распределение метеостанций. Большинство из них располагались в крупных населенных пунктах, что снижало их репрезентативность для малонаселенных регионов. В [54] предложено учитывать станции в радиусе 50 км от центра региона для расчета температур. В [29] и в данном исследовании был принят критерий в 200 км, что позволило увеличить объем выборки и повысить стабильность оценок.

Кривые «доза – эффект» на основе разных источников данных схожи. Однако при использовании данных реанализа риски, связанные с жарой, оказались выше. В других работах также наблюдались наибольшие расхождения для высоких температур, тогда как риски, связанные с холодом, оставались сопоставимыми. В некоторых исследованиях растровые данные также давали завышенные оценки рисков жары [30], но в других случаях наблюдалась обратная тенденция [15, 52, 54].

Атмосферные реанализы, основанные на моделировании, не всегда учитывают локальные микрогеографические эффекты и экстремальные температуры из-за усреднения данных. Однако репрезентативность наблюдений метеостанций для таких обширных территорий также ограничена из-за неравномерного охвата.

Наименьшие расхождения между источниками данных наблюдались в регионах с равномерным расселением и равнинным рельефом. В других случаях возникали проблемы: в Чукотском АО согласованность оценок оказалась наименьшей. В Адыгее использовалось избыточное количество метеостанций, плохо отражающих местные условия, а в Санкт-Петербурге данные реанализа искажались из-за приморского расположения [51].

Таким образом, лишь в наиболее простых случаях оценки температуры и связанных с ними рисков на основе разных источников данных сопоставимы. В регионах с разреженной сетью метеостанций предпочтительнее использовать реанализы, тогда как для анализа внутри городов подходят данные метеостанций. Метеоданные доступны в реальном времени, что удобно для оперативных оценок, однако они могут содержать пропуски и быть фрагментарными. Для долгосрочных рядов предпочтительнее данные реанализов, составленных по единой методологии, за счет их полноты и широкого охвата.

При сравнении подходов к агрегированию данных метеостанций оценка температур по муниципалитетам оказалась эффективнее, чем по регионам. В крупных и малонаселенных регионах центр населения плохо отражает реальное расселение, снижая точность данных. Поэтому корректнее оценивать средние температуры на субрегиональном уровне с последующим агрегированием результатов для региона в целом.

Проблемы и ограничения. В работе оценивались температурные риски на уровне регионов РФ и сравнивалась применимость различных источников данных о температурах. Результаты согласуются с выводами других исследований, использовавших более детализированные данные и анализировавших кратковременные колебания смертности. Однако необходимо учитывать ряд ограничений, которые могли повлиять на интерпретацию полученных результатов.

Во-первых, несмотря на общую стабильность временных рядов смертности в большинстве регионов, в некоторых (например, Чукотский АО, Магаданская область) наблюдалась высокая волатильность данных. Это затруднило получение достоверных результатов, хотя использование метааналитических подходов частично сгладило проблему. Тем не менее для отдельных регионов адекватные оценки рисков смерти, связанных с температурами, так и не были получены.

Во-вторых, спецификация функции «доза – эффект» могла повлиять на результаты моделирования. Несмотря на наилучшие значения информационных критериев выбранной модели, расположение узлов сплайнов и структура лагов могли исказить оценки.

В-третьих, отсутствие данных о загрязнении воздуха ограничило анализ. На региональном уровне в России такие данные доступны только в рамках реанализов, так как разветвленной сети наблюдений за качеством воздуха с открытыми и доступными данными нет, что не позволяет включить их в модель.

Выводы. Целью работы был анализ смертности, связанной с температурами, на основе данных атмосферного реанализа EAC4 и метеорологических станций. Региональные значения температур рассчитывались тремя способами, которые продемонстрировали схожие паттерны временных рядов.

Зависимость смертности от температур в регионах России имела *J*-образную форму: риски были выше при низких температурах. Так, для 1-го процентиля температур относительные риски достигли 1,25, тогда как для 99-го – 1,02 (по данным метеостанций) и 1,07 (согласно реанализу). Это объясняется учетом лаговых эффектов воздействия температур на здоровье на протяжении нескольких недель, что позволяет лучше учесть негативные последствия холода.

ТМС в большинстве регионов находились в пределах 15–20 °C, соответствуя 75–85-му процентилям распределения температур (по данным реанализа). При использовании данных метеостанций температуры минимальной смертности оказывались на несколько градусов выше. Оптимальные температуры чаще выше в теплых регионах, что указывает на адаптацию населения к преобладающим условиям. Знание пороговых значений рисков позволяет эффективнее оценивать угрозы для жизни и разрабатывать меры для предотвращения негативных последствий влияния температур. К таким мерам относятся системы оповещения, информирования и предупреждения населения о наступлении волн жары или холода.

Оба источника данных показали свою применимость, но в малонаселенных регионах с разреженной сетью станций достоверность данных метеонаблюдений снижалась, что влияло на согласованность оценок риска. Например, температура минимальной смертности по данным метеостанций в таких регионах была завышенной относительно реанализа.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Meehl G.A., Tebaldi C. More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century // Science. – 2004. – Vol. 305, № 5686. – P. 994–997. DOI: 10.1126/science.1098704

2. Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios / A. Gasparrini, Y. Guo, F. Sera, A.M. Vicedo-Cabrera, V. Huber, S. Tong, M. de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, P. Hilario Nascimento Saldiva [et al.] // Lancet Planet. Health. – 2017. – Vol. 1, № 9. – P. e360–e367. DOI: 10.1016/S2542-5196(17)30156-0

3. Estimating future heat-related and cold-related mortality under climate change, demographic and adaptation scenarios in 854 European cities / P. Masselot, M.N. Mistry, S. Rao, V. Huber, A. Monteiro, E. Samoli, M. Stafoggia, F. de'Donato [et al.] // Nat. Med. – 2025. – Vol. 31, № 4. – P. 1294–1302. DOI: 10.1038/s41591-024-03452-2

4. Basu R. High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008 // Environ. Health. – 2009. – Vol. 8. – P. 40. DOI: 10.1186/1476-069X-8-40

5. Kovats R.S., Hajat S. Heat Stress and Public Health: A Critical Review // Annu. Rev. Public Health. – 2008. – Vol. 29. – P. 41–55. DOI: 10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843

6. Cardiorespiratory effects of heatwaves: A systematic review and meta-analysis of global epidemiological evidence / J. Cheng, Z. Xu, H. Bambrick, V. Prescott, N. Wang, Y. Zhang, H. Su, S. Tong, W. Hu // Environ. Res. – 2019. – Vol. 177. – P. 108610. DOI: 10.1016/j.envres.2019.108610

7. Revich B., Shaposhnikov D. The influence of heat and cold waves on mortality in Russian subarctic cities with varying climates // Int. J. Biometeorol. – 2022. – Vol. 66, № 12. – P. 2501–2515. DOI: 10.1007/s00484-022-02375-2

8. Ревич Б.А., Шапошников Д.А. Изменения климата, волны жары и холода как факторы риска повышенной смертности населения в некоторых регионах России // Проблемы прогнозирования. – 2012. – № 2 (131). – С. 122–139.

9. Mortality Related to Air Pollution with the Moscow Heat Wave and Wildfire of 2010 / D. Shaposhnikov, B. Revich, T. Bellander, G. Bero Bedada, M. Bottai, T. Kharkova, E. Kvasha, E. Lezina [et al.] // Epidemiology. – 2014. – Vol. 25, № 3. – P. 359–364. DOI: 10.1097/EDE.0000000000000090

10. What is cold-related mortality? A multi-disciplinary perspective to inform climate change impact assessments / K. Arbuthnott, S. Hajat, C. Heaviside, S. Vardoulakis // Environ. Int. – 2018. – Vol. 121, Pt 1. – P. 119–129. DOI: 10.1016/j.envint.2018.08.053

11. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study / A. Gasparrini, Y. Guo, M. Hashizume, E. Lavigne, A. Zanobetti, J. Schwartz, A. Tobias, S. Tong [et al.] // Lancet. – 2015. – Vol. 386, № 9991. – P. 369–375. DOI: 10.1016/S0140-6736(14)62114-0

12. Barnett A.G., Tong S., Clements A.C.A. What measure of temperature is the best predictor of mortality? // Environ. Res. – 2010. – Vol. 110, № 6. – P. 604–611. DOI: 10.1016/j.envres.2010.05.006

13. Do Biometeorological Indices Improve Modeling Outcomes of Heat-Related Mortality? / P. Vaneckova, G. Neville, V. Tippett, P. Aitken, G. Fitzgerald, S. Tong // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 2011. – Vol. 50, № 6. – P. 1165–1176. DOI: 10.1175/2011JAMC2632.1

14. Определение порогов температурно-зависимой смертности на основе универсального индекса теплового комфорта – UTCI / Н.В. Шартова, Д.А. Шапошников, П.И. Константинов, Б.А. Ревич // Анализ риска здоровью. – 2019. – № 3. – С. 83–93. DOI: 10.21668/health.risk/2019.3.10

15. Evaluation of the ERA5 reanalysis-based Universal Thermal Climate Index on mortality data in Europe / A. Urban, C. Di Napoli, H.L. Cloke, J. Kyselý, F. Pappenberger, F. Sera, R. Schneider, A.M. Vicedo-Cabrera [et al.] // Environ. Res. – 2021. – Vol. 198. – P. 111227. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111227

16. Revich B., Shaposhnikov D. Temperature-induced excess mortality in Moscow, Russia // Int. J. Biometeorol. – 2008. – Vol. 52, № 5. – P. 367–374. DOI: 10.1007/s00484-007-0131-6

17. Воздействие высоких температур атмосферного воздуха на здоровье населения в Твери / Б.А. Ревич, Д.А. Шапошников, В.Т. Галкин, С.А. Крылов, А.Б. Черткова // Гигиена и санитария. – 2005. – № 2. – С. 20–24.

18. Ревич Б.А., Шапошников Д.А., Семутникова Е.Г. Климатические условия и качество атмосферного воздуха как факторы риска смертности населения Москвы // Медицина труда и промышленная экология. – 2008. – № 7. – С. 29–35.

19. Heat waves in southern cities of European Russia as a risk factor for premature mortality / B.A. Revich, D.A. Shaposhnikov, M.A. Podol'naya, T.L. Khor'kova, E.A. Kvasha // Stud. Russ. Econ. Dev. – 2015. – Vol. 26. – P. 142–150. DOI: 10.1134/S1075700715020100

20. Ревич Б.А., Шапошников Д.А. Волны холода в южных городах европейской части России и преждевременная смертность населения // Проблемы прогнозирования. – 2016. – № 2 (155). – С. 125–131.

21. Температура воздуха и смертность: исследование пороговых значений жары и чувствительности населения на примере г. Ростов-на-Дону / Н.В. Шартова, Д.А. Шапошников, П.И. Константинов, Б.А. Ревич // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2019. – Т. 2. – С. 66–94. DOI: 10.21513/2410-8758-2019-2-66-94

22. Волны жары и холода в городах, расположенных в арктической и субарктической зонах как факторы риска повышения смертности населения на примере Архангельска, Мурманска и Якутска / Б.А. Ревич, Д.А. Шапошников, О.А. Анисимов, М.А. Белолуцкая // Гигиена и санитария. – 2018. – Т. 97, № 9. – С. 791–798. DOI: 10.18821/0016-9900-2018-97-9-791-798

23. Impact of Temperature Waves on the Health of Residents in Cities of the Northwestern Region of Russia / B.A. Revich, D.A. Shaposhnikov, O.A. Anisimov, M.A. Belolutskaya // Stud. Russ. Econ. Dev. – 2019. – Vol. 30, № 3. – P. 327–333. DOI: 10.1134/S1075700719030158

24. Черных Д.А., Тасейко О.В. Оценка риска повышения смертности от температурных волн для населения города Красноярска // Экология человека. – 2018. – № 2. – С. 3–8. DOI: 10.33396/1728-0869-2018-2-3-8

25. Григорьева Е.А. Волны тепла на юге Дальнего Востока и здоровье человека // ЗНиСО. – 2017. – № 2 (287). – С. 11–14. DOI: 10.35627/2219-5238/2017-287-2-11-14

26. Grigorieva E.A. Heat and cold waves at the South of the Russian Far East in 1999–2017 // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2020. – Vol. 606, № 1. – P. 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012016

27. Shaposhnikov D., Revich B. Toward meta-analysis of impacts of heat and cold waves on mortality in Russian North // Urban Climate. – 2016. – Vol. 15. – P. 16–24. DOI: 10.1016/j.uclim.2015.11.007

28. Otrachshenko V., Popova O., Solomin P. Health Consequences of the Russian Weather // Ecological Economics. – 2017. – Vol. 132. – P. 290–306. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2016.10.021

29. Otrachshenko V., Popova O., Solomin P. Misfortunes never come singly: Consecutive weather shocks and mortality in Russia // Econ. Hum. Biol. – 2018. – Vol. 31. – P. 249–258. DOI: 10.1016/j.ehb.2018.08.008

30. Comparison of temperature-mortality associations estimated with different exposure metrics / K.R. Weinberger, K.R. Spangler, A. Zanobetti, J.D. Schwartz, G.A. Wellenius // Environ. Epidemiol. – 2019. – Vol. 3, № 5. – P. e072. DOI: 10.1097/EE9.0000000000000072

31. Evaluating the association between extreme heat and mortality in urban Southwestern Ontario using different temperature data sources / K.K. Clemens, A.M. Ouédraogo, L. Li, J.A. Voogt, J. Gilliland, E. Scott Krayenhoff, S. Leroyer, S.Z. Shariff // Sci. Rep. – 2021. – Vol. 11, № 1. – P. 8153. DOI: 10.1038/s41598-021-87203-0

32. Daly C. Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets // Int. J. Climatol. – 2006. – Vol. 26, № 6. – P. 707–721. DOI: 10.1002/joc.1322

33. Spangler K.R., Weinberger K.R., Wellenius G.A. Suitability of gridded climate datasets for use in environmental epidemiology // J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol. – 2019. – Vol. 29, № 6. – P. 777–789. DOI: 10.1038/s41370-018-0105-2

34. Consistency of Temperature and Precipitation Extremes across Various Global Gridded In Situ and Reanalysis Datasets / M.G. Donat, J. Sillmann, S. Wild, L.V. Alexander, T. Lippmann, F.W. Zwiers // J. Climate. – 2014. – Vol. 27, № 13. – P. 5019–5035. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00405.1

35. Comparison of weather station and climate reanalysis data for modelling temperature-related mortality / M.N. Mistry, R. Schneider, P. Masselot, D. Royé, B. Armstrong, J. Kyselý, H. Orru, F. Sera [et al.] // Sci. Rep. – 2022. – Vol. 12, № 1. – P. 5178. DOI: 10.1038/s41598-022-09049-4

36. Comparison of Population-Weighted Exposure Estimates of Air Pollutants Based on Multiple Geostatistical Models in Beijing, China / Y. Wu, J. Xu, Z. Liu, B. Han, W. Yang, Z. Bai // Toxics. – 2024. – Vol. 12, № 3. – P. 197. DOI: 10.3390/toxics12030197

37. Keller J.P., Peng R.D. Error in estimating area-level air pollution exposures for epidemiology // Environmetrics. – 2019. – Vol. 30, № 8. – P. e2573. DOI: 10.1002/env.2573

38. Associations between ambient air pollution and daily emergency department attendances for cardiovascular disease in the elderly (65+ years), Sydney, Australia / B. Jalaludin, G. Morgan, D. Lincoln, V. Sheppeard, R. Simpson, S. Corbett // J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol. – 2006. – Vol. 16, № 3. – P. 225–237. DOI: 10.1038/sj.jea.7500451

39. A Comparative Analysis of the Temperature-Mortality Risks Using Different Weather Datasets Across Heterogeneous Regions / E. de Schrijver, C.L. Folly, R. Schneider, D. Royé, O.H. Franco, A. Gasparrini, A.M. Vicedo-Cabrera // GeoHealth. – 2021. – Vol. 5, № 5. – P. e2020GH000363. DOI: 10.1029/2020GH000363

40. Grigorieva E.A., Revich B.A. Health Risks to the Russian Population from Temperature Extremes at the Beginning of the XXI Century // Atmosphere. – 2021. – Vol. 12, № 10. – P. 1331. DOI: 10.3390/atmos12101331

41. The effect of temporal data aggregation to assess the impact of changing temperatures in Europe: an epidemiological modelling study / J. Ballester, K.R. van Daalen, Z.-Y. Chen, H. Achebak, J.M. Antó, X. Basagaña, J.-M. Robine, F.R. Herrmann [et al.] // Lancet Reg. Health Eur. – 2023. – Vol. 36. – P. 100779. DOI: 10.1016/j.lanepe.2023.100779

42. Russian Short-Term Mortality Fluctuations Data Series / A.E. Shchur, S.A. Timonin, E.V. Churilova, E.V. Sergeev, V.V. Sokolova, O.A. Rodina, B.A. Shamsutdinov, D.A. Jdanov, V.M. Shkolnikov // Population and Economics. – 2023. – Vol. 7, № 3. – P. 188–197. DOI: 10.3897/popecon.7.e114628

43. Inness A., Engelen R., Flemming J. The new CAMS global reanalysis of atmospheric composition: Newsletter [Электронный ресурс] // ECMWF. – 2019. – № 158. – URL: https://www.ecmwf.int/en/newsletter/158/meteorology/new-cams-global-reanalysis-atmospheric-composition (дата обращения: 11.04.2025).

44. Gasparrini A. Distributed Lag Linear and Non-Linear Models in R: The Package dlnm // J. Stat. Softw. – 2011. – Vol. 43, № 8. – P. 1–20.

45. Geographical Variations of the Minimum Mortality Temperature at a Global Scale: A Multicountry Study / A. Tobías, M. Hashizume, Y. Honda, F. Sera, C. Fook Sheng Ng, Y. Kim, D. Roye, Y. Chung [et al.] // Environ. Epidemiol. – 2021. – Vol. 5, № 5. – P. e169. DOI: 10.1097/EE9.0000000000000169

46. Gasparrini A. Modeling exposure-lag-response associations with distributed lag non-linear models // Stat. Med. – 2013. – Vol. 33, № 5. – P. 881–899. DOI: 10.1002/sim.5963

47. Gasparrini A., Armstrong B., Kenward M.G. Multivariate meta-analysis for non-linear and other multi-parameter associations // Stat. Med. – 2012. – Vol. 31, № 29. – P. 3821–3839. DOI: 10.1002/sim.5471

48. An extended mixed-effects framework for meta-analysis / F. Sera, B. Armstrong, M. Blangiardo, A. Gasparrini // Stat. Med. – 2019. – Vol. 38, № 29. – P. 5429–5444. DOI: 10.1002/sim.8362

49. Mapping the increased minimum mortality temperatures in the context of global climate change / Q. Yin, J. Wang, Z. Ren, J. Li, Y. Guo // Nat. Commun. – 2019. – Vol. 10, № 1. – P. 4640. DOI: 10.1038/s41467-019-12663-y

50. Ruuhela R., Hyvärinen O., Jylhä K. Regional Assessment of Temperature-Related Mortality in Finland // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2018. – Vol. 15, № 3. – P. 406. DOI: 10.3390/ijerph15030406

51. Study on the association between ambient temperature and mortality using spatially resolved exposure data / M. Lee, L. Shi, A. Zanobetti, J.D. Schwartz // Environ. Res. – 2016. – Vol. 151. – P. 610–617. DOI: 10.1016/j.envres.2016.08.029

52. Royé D., Íñiguez C., Tobías A. Comparison of temperature–mortality associations using observed weather station and reanalysis data in 52 Spanish cities // Environ. Res. – 2020. – Vol. 183. – P. 109237. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109237

53. Choi H.M., Bell M.L. Heat-mortality relationship in North Carolina: Comparison using different exposure methods // J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol. – 2023. – Vol. 33, № 4. – P. 637–645. DOI: 10.1038/s41370-023-00544-y

54. Hanigan I., Hall G., Dear K.B.G. A comparison of methods for calculating population exposure estimates of daily weather for health research // Int. J. Health Geogr. – 2006. – Vol. 5. – P. 38. DOI: 10.1186/1476-072X-5-38

Максименко М.Р. Риски смерти, связанные с температурами: влияние различных источников климатических данных в регионах России в 2004–2019 гг. // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 2. – С. 30–45. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.03

UDC 612.014.43
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.03.eng

Read online

Research article

TEMPERATURE-RELATED MORTALITY RISKS: EFFECTS OF DIFFERENT SOURCES OF CLIMATIC DATA IN THE RF REGIONS IN 2004–2019

M.R. Maksimenko

National Research University Higher School of Economics, 11 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russian Federation

Climate change and increasing thermal stress highlights the need to investigate the temperature-mortality relationship using long-term aggregated temperature data. Globally, two primary sources of temperature data are utilized: ground-based meteorological observations and raster datasets. Ground-based observations from meteorological stations offer precise local temperature measurements but lack comprehensive spatial coverage. In contrast, raster data provide complete spatial coverage but may not accurately represent local microclimatic conditions. This study aims to compare these data sources for analyzing temperature-related mortality across regions of Russia.

To assess the exposure-response relationship, a two-stage modeling approach was applied. At the first stage, region-specific estimates were derived using a distributed lag model. At the second stage, pooled estimates were computed through random-effects meta-regression.

The temperature-mortality relationship in Russia is characterized by a typical J-shaped curve, with cold temperatures posing a higher mortality risk. Heat-related risks were generally higher when estimated using raster data compared to in-situ observations. Minimum mortality risk temperatures typically fall between 15 and 20 °C, with higher thresholds observed in warmer regions.

This study suggests general comparability of raster and point-based temperature data for mortality analysis. However, in certain regions, particularly large and sparsely populated ones, estimates diverged due to multiple factors.

Keywords: *climate change, atmosphere reanalysis, air temperature, temperature stress, raster data, ground-based meteorological observations, mortality, regions of Russia.*

References

1. Meehl G.A., Tebaldi C. More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science*, 2004, vol. 305, no. 5686, pp. 994–997. DOI: 10.1126/science.1098704

2. Gasparrini A., Guo Y., Sera F., Vicedo-Cabrera A.M., Huber V., Tong S., de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho M., Hilario Nascimento Saldiva P. [et al.]. Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. *Lancet Planet. Health*, 2017, vol. 1, no. 9, pp. e360–e367. DOI: 10.1016/S2542-5196(17)30156-0

3. Masselot P., Mistry M.N., Rao S., Huber V., Monteiro A., Samoli E., Stafoggia M., de'Donato F. [et al.]. Estimating future heat-related and cold-related mortality under climate change, demographic and adaptation scenarios in 854 European cities. *Nat. Med.*, 2025, vol. 31, no. 4, pp. 1294–1302. DOI: 10.1038/s41591-024-03452-2

4. Basu R. High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environ. Health*, 2009, vol. 8, no. 1, pp. 40. DOI: 10.1186/1476-069X-8-40

5. Kovats R.S., Hajat S. Heat Stress and Public Health: A Critical Review. *Annu. Rev. Public Health*, 2008, vol. 29, pp. 41–55. DOI: 10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843

6. Cheng J., Xu Z., Bambrick H., Prescott V., Wang N., Zhang Y., Su H., Tong S., Hu W. Cardiorespiratory effects of heatwaves: A systematic review and meta-analysis of global epidemiological evidence. *Environ. Res.*, 2019, vol. 177, pp. 108610. DOI: 10.1016/j.envres.2019.108610

7. Revich B., Shaposhnikov D. The influence of heat and cold waves on mortality in Russian subarctic cities with varying climates. *Int. J. Biometeorol.*, 2022, vol. 66, no. 12, pp. 2501–2515. DOI: 10.1007/s00484-022-02375-2

8. Revich B.A., Shaposhnikov D.A. Climate change, heat waves, and cold spells as risk factors for increased mortality in some regions of Russia. *Studies on Russian economic development*, 2012, vol. 23, no. 2, pp. 195–207. DOI: 10.1134/S1075700712020116

9. Shaposhnikov D., Revich B., Bellander T., Bero Bedada G., Bottai M., Kharkova T., Kvasha E., Lezina E. [et al.]. Mortality Related to Air Pollution with the Moscow Heat Wave and Wildfire of 2010. *Epidemiology*, 2014, vol. 25, no. 3, pp. 359–364. DOI: 10.1097/EDE.0000000000000090

© Maksimenko M.R., 2025

Mikhail R. Maksimenko – Junior Researcher (e-mail: mikemaksimenko@gmail.com; tel.: +7 (915) 476-60-68; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8441-6676).

10. Arbuthnott K., Hajat S., Heaviside C., Vardoulakis S. What is cold-related mortality? A multi-disciplinary perspective to inform climate change impact assessments. *Environ. Int.*, 2018, vol. 121, pt 1, pp. 119–129. DOI: 10.1016/j.envint.2018.08.053

11. Gasparrini A., Guo Y., Hashizume M., Lavigne E., Zanobetti A., Schwartz J., Tobias A., Tong S. [et al.]. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *Lancet*, 2015, vol. 386, no. 9991, pp. 369–375. DOI: 10.1016/S0140-6736(14)62114-0

12. Barnett A.G., Tong S., Clements A.C.A. What measure of temperature is the best predictor of mortality? *Environ. Res.*, 2010, vol. 110, no. 6, pp. 604–611. DOI: 10.1016/j.envres.2010.05.006

13. Vaneckova P., Neville G., Tippett V., Aitken P., Fitzgerald G., Tong S. Do Biometeorological Indices Improve Modeling Outcomes of Heat-Related Mortality? *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, vol. 50, no. 6, pp. 1165–1176. DOI: 10.1175/2011JAMC2632.1

14. Shartova N.V., Shaposhnikov D.A., Konstantinov P.I., Revich B.A. Universal thermal climate index (UTCI) applied to determine thresholds for temperature-related mortality. *Health Risk Analysis*, 2019, no. 3, pp. 83–93. DOI: 10.21668/health.risk/2019.3.10.eng

15. Urban A., Di Napoli C., Cloke H.L., Kyselý J., Pappenberger F., Sera F., Schneider R., Vicedo-Cabrera A.M. [et al.]. Evaluation of the ERA5 reanalysis-based Universal Thermal Climate Index on mortality data in Europe. *Environ. Res.*, 2021, vol. 198, pp. 111227. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111227

16. Revich B., Shaposhnikov D. Temperature-induced excess mortality in Moscow, Russia. *Int. J. Biometeorol.*, 2008, vol. 52, no. 5, pp. 367–374. DOI: 10.1007/s00484-007-0131-6

17. Revich B.A., Shaposhnikov D.A., Galkin V.T., Krylov S.A., Chertkova A.B. Impact of high ambient air temperatures on human health in Tver. *Gigiena i sanitariya*, 2005, no. 2, pp. 20–24 (in Russian).

18. Revitch B.A., Shaposhnikov D.A., Semoutnikova E.G. Climate conditions and ambient air quality as risk factors for mortality in Moscow. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2008, no. 7, pp. 29–35 (in Russian).

19. Revich B.A., Shaposhnikov D.A., Podol'naya M.A., Khor'kova T.L., Kvasha E.A. Heat waves in southern cities of European Russia as a risk factor for premature mortality. *Stud. Russ. Econ. Dev.*, 2015, vol. 26, pp. 142–150. DOI: 10.1134/S1075700715020100

20. Revich B.A., Shaposhnikov D.A. Cold waves in southern cities of European Russia and premature mortality. *Stud. Russ. Econ. Dev.*, 2016, vol. 27, no. 2, pp. 210–215. DOI: 10.1134/S107570071602012X

21. Shartova N.V., Shaposhnikov D.A., Konstantinov P.I., Revich B.A. Air temperature and mortality: heat thresholds and population vulnerability study in Rostov-on-Don. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2019, vol. 2, pp. 66–94. DOI: 10.21513/2410-8758-2019-2-66-94 (in Russian).

22. Revich B.A., Shaposhnikov D.A., Anisimov O.A., Belolutskaia M.A. Heat waves and cold spells in three arctic and subarctic cities as mortality risk factors. *Gigiena i sanitariya*, 2018, vol. 97, no. 9, pp. 791–798. DOI: 10.18821/0016-9900-2018-97-9-791-798 (in Russian).

23. Revich B.A., Shaposhnikov D.A., Anisimov O.A., Belolutskaya M.A. Impact of Temperature Waves on the Health of Residents in Cities of the Northwestern Region of Russia. *Stud. Russ. Econ. Dev.*, 2019, vol. 30, no. 3, pp. 327–333. DOI: 10.1134/S1075700719030158

24. Chernykh D.A., Taseiko O.V. Assessment of the risk mortality from thermal waves in Krasnoyarsk city. *Ekologiya cheloveka*, 2018, no. 2, pp. 3–8. DOI: 10.33396/1728-0869-2018-2-3-8 (in Russian).

25. Grigorieva E.A. Heat waves at the southern part of the Far East and human health. *ZNiSO*, 2017, no. 2 (287), pp. 11–14. DOI: 10.35627/2219-5238/2017-287-2-11-14 (in Russian).

26. Grigorieva E.A. Heat and cold waves at the South of the Russian Far East in 1999–2017. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020, vol. 606, no. 1, pp. 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012016

27. Shaposhnikov D., Revich B. Toward meta-analysis of impacts of heat and cold waves on mortality in Russian North. *Urban Climate*, 2016, vol. 15, pp. 16–24. DOI: 10.1016/j.uclim.2015.11.007

28. Otrachshenko V., Popova O., Solomin P. Health Consequences of the Russian Weather. *Ecological Economics*, 2017, vol. 132, pp. 290–306. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2016.10.021

29. Otrachshenko V., Popova O., Solomin P. Misfortunes never come singly: Consecutive weather shocks and mortality in Russia. *Econ. Hum. Biol.*, 2018, vol. 31, pp. 249–258. DOI: 10.1016/j.ehb.2018.08.008

30. Weinberger K.R., Spangler K.R., Zanobetti A., Schwartz J.D., Wellenius G.A. Comparison of temperature-mortality associations estimated with different exposure metrics. *Environ. Epidemiol.*, 2019, vol. 3, no. 5, pp. e072. DOI: 10.1097/EE9.0000000000000072

31. Clemens K.K., Ouédraogo A.M., Li L., Voogt J.A., Gilliland J., Scott Krayenhoff E., Leroyer S., Shariff S.Z. Evaluating the association between extreme heat and mortality in urban Southwestern Ontario using different temperature data sources. *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 8153. DOI: 10.1038/s41598-021-87203-0

32. Daly C. Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets. *Int. J. Clim.*, 2006, vol. 26, no. 6, pp. 707–721. DOI: 10.1002/joc.1322

33. Spangler K.R., Weinberger K.R., Wellenius G.A. Suitability of gridded climate datasets for use in environmental epidemiology. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 2019, vol. 29, no. 6, pp. 777–789. DOI: 10.1038/s41370-018-0105-2

34. Donat M.G., Sillmann J., Wild S., Alexander L.V., Lippmann T., Zwiers F.W. Consistency of Temperature and Precipitation Extremes across Various Global Gridded In Situ and Reanalysis Datasets. *J. Climate*, 2014, vol. 27, no. 13, pp. 5019–5035. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00405.1

35. Mistry M.N., Schneider R., Masselot P., Royé D., Armstrong B., Kyselý J., Orru H., Sera F. [et al.]. Comparison of weather station and climate reanalysis data for modelling temperature-related mortality. *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 5178. DOI: 10.1038/s41598-022-09049-4

36. Wu Y., Xu J., Liu Z., Han B., Yang W., Bai Z. Comparison of Population-Weighted Exposure Estimates of Air Pollutants Based on Multiple Geostatistical Models in Beijing, China. *Toxics*, 2024, vol. 12, no. 3, pp. 197. DOI: 10.3390/toxics12030197

37. Keller J.P., Peng R.D. Error in estimating area-level air pollution exposures for epidemiology. *Environmetrics*, 2019, vol. 30, no. 8, pp. e2573. DOI: 10.1002/env.2573

38. Jalaludin B., Morgan G., Lincoln D., Sheppeard V., Simpson R., Corbett S. Associations between ambient air pollution and daily emergency department attendances for cardiovascular disease in the elderly (65+ years), Sydney, Australia. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 2006, vol. 16, no. 3, pp. 225–237. DOI: 10.1038/sj.jea.7500451

39. De Schrijver E., Folly C.L., Schneider R., Royé D., Franco O.H., Gasparrini A., Vicedo-Cabrera A.M. A Comparative Analysis of the Temperature-Mortality Risks Using Different Weather Datasets Across Heterogeneous Regions. *GeoHealth*, 2021, vol. 5, no. 5, pp. e2020GH000363. DOI: 10.1029/2020GH000363

40. Grigorieva E.A., Revich B.A. Health Risks to the Russian Population from Temperature Extremes at the Beginning of the XXI Century. *Atmosphere*, 2021, vol. 12, no. 10, pp. 1331. DOI: 10.3390/atmos12101331

41. Ballester J., van Daalen K.R., Chen Z.-Y., Achebak H., Antó J.M., Basagaña X., Robine J.-M., Herrmann F.R. [et al.]. The effect of temporal data aggregation to assess the impact of changing temperatures in Europe: an epidemiological modelling study. *Lancet Reg. Health Eur.*, 2023, vol. 36, pp. 100779. DOI: 10.1016/j.lanepe.2023.100779

42. Shchur A.E., Timonin S.A., Churilova E.V., Sergeev E.V., Sokolova V.V., Rodina O.A., Shamsutdinov B.A., Jdanov D.A., Shkolnikov V.M. Russian Short-Term Mortality Fluctuations Data Series. *Population and Economics*, 2023, vol. 7, no. 3, pp. 188–197. DOI: 10.3897/popecon.7.e114628

43. Inness A., Engelen R., Flemming J. The new CAMS global reanalysis of atmospheric composition: Newsletter. *ECMWF*, 2019, no. 158. Available at: https://www.ecmwf.int/en/newsletter/158/meteorology/new-cams-global-reanalysis-atmospheric-composition (April 11, 2025).

44. Gasparrini A. Distributed Lag Linear and Non-Linear Models in R: The Package dlnm. *J. Stat. Softw.*, 2011, vol. 43, no. 8, pp. 1–20.

45. Tobías A., Hashizume M., Honda Y., Sera F., Fook Sheng Ng C., Kim Y., Roye D., Chung Y. [et al.]. Geographical Variations of the Minimum Mortality Temperature at a Global Scale: A Multicountry Study. *Environ. Epidemiol.*, 2021, vol. 5, no. 5, pp. e169. DOI: 10.1097/EE9.0000000000000169

46. Gasparrini A. Modeling exposure-lag-response associations with distributed lag non-linear models. *Stat. Med.*, 2013, vol. 33, no. 5, pp. 881–899. DOI: 10.1002/sim.5963

47. Gasparrini A., Armstrong B., Kenward M.G. Multivariate meta-analysis for non-linear and other multi-parameter associations. *Stat. Med.*, 2012, vol. 31, no. 29, pp. 3821–3839. DOI: 10.1002/sim.5471

48. Sera F., Armstrong B., Blangiardo M., Gasparrini A. An extended mixed-effects framework for meta-analysis. *Stat. Med.*, 2019, vol. 38, no. 29, pp. 5429–5444. DOI: 10.1002/sim.8362

49. Yin Q., Wang J., Ren Z., Li J., Guo Y. Mapping the increased minimum mortality temperatures in the context of global climate change. *Nat. Commun.*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 4640. DOI: 10.1038/s41467-019-12663-y

50. Ruuhela R., Hyvärinen O., Jylhä K. Regional Assessment of Temperature-Related Mortality in Finland. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 406. DOI: 10.3390/ijerph15030406

51. Lee M., Shi L., Zanobetti A., Schwartz J.D. Study on the association between ambient temperature and mortality using spatially resolved exposure data. *Environ. Res.*, 2016, vol. 151, pp. 610–617. DOI: 10.1016/j.envres.2016.08.029

52. Royé D., Íñiguez C., Tobías A. Comparison of temperature–mortality associations using observed weather station and reanalysis data in 52 Spanish cities. *Environ. Res.*, 2020, vol. 183, pp. 109237. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109237

53. Choi H.M., Bell M.L. Heat-mortality relationship in North Carolina: Comparison using different exposure methods. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 2023, vol. 33, no. 4, pp. 637–645. DOI: 10.1038/s41370-023-00544-y

54. Hanigan I., Hall G., Dear K.B.G. A comparison of methods for calculating population exposure estimates of daily weather for health research. *Int. J. Health Geogr.*, 2006, vol. 5, pp. 38. DOI: 10.1186/1476-072X-5-38

Maksimenko M.R. Temperature-related mortality risks: effects of different sources of climatic data in the RF regions in 2004–2019. Health Risk Analysis, 2025, no. 2, pp. 30–45. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.03.eng

Получена: 07.05.2025
Одобрена: 20.05.2025
Принята к публикации: 22.06.2025

УДК 614.2, 614.8, 612.014.43, 551.582.3
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.04

Читать онлайн

Научная статья

СПУТНИКОВОЕ КАРТИРОВАНИЕ РИСКА ПРЕЖДЕВРЕМЕННОЙ СМЕРТНОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ, ВЫЗВАННЫХ ПЕРЕГРЕВОМ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ В РОССИЙСКИХ МЕГАЛОПОЛИСАХ

В.И. Горный[1], С.Г. Крицук[1], И.Ш. Латыпов[1], А.А. Тронин[1], Р.В. Бузинов[2], С.Н. Носков[2], Г.В. Еремин[2], Д.С. Борисова[2]

[1]Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Российская Федерация, 199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия Васильевского острова, 39
[2]Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья, Российская Федерация, 191036, г. Санкт-Петербург, 2-я Советская улица, 4

Целью данного исследования является разработка методики применения материалов спутниковых съемок для картирования рисков перегрева городской среды и экономических ущербов, вызванных преждевременной смертностью населения от перегрева в крупных городах России, таких как Омск и Ростов-на-Дону.

Назначением разработки является получение количественных данных, которые могут являться информационной поддержкой системы принятия управленческих решений в области экологической безопасности и общественного здравоохранения. Предложено теоретическое обоснование методики спутникового картирования потенциальных рисков, смертности и экономических потерь, вызванных перегревом городской среды. Такая информация позволяет трансформировать результаты многолетнего спутникового мониторинга температуры городской среды в практические рекомендации для разработки стратегий городского планирования и управления здоровьем населения. Актуальность этого исследования обусловлена продолжающимся глобальным потеплением и возрастанием его негативного воздействия на здоровье городских жителей.

Результатом разработки явились цифровые карты рисков смертности от перегрева и экономических ущербов от преждевременной смертности от перегрева в Омске и Ростове-на-Дону – городах, имеющих почти одинаковое количество жителей, но расположенных в разных климатических зонах. Карты имеют пространственное разрешение 100 × 100 м, что позволяет анализировать ситуацию как в городе в целом, так и внутри муниципальных районов. Сравнение результатов спутникового картирования с данными медицинской статистики по отдельным районам г. Омска показало, что относительная погрешность картирования смертности составляет ~ 20 %. Полученные результаты показали как целесообразность опережающих инвестиций в снижение риска перегрева городской среды в густонаселенные районы с высоким риском смертности от перегрева городской среды, так и потенциальную возможность использования этой информации в городском планировании мер, направленных на адаптацию системы здравоохранения к потеплению климата.

Ключевые слова: *потепление климата, городские острова тепла, мегалополисы, Омск, Ростов-на-Дону, спутник, картирование, перегрев, риск, смертность, экономические потери.*

© Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А., Бузинов Р.В., Носков С.Н., Еремин Г.В., Борисова Д.С., 2025

Горный Виктор Иванович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией дистанционных методов геоэкологического мониторинга и геоинформатики (e-mail: v.i.gornyy@mail.ru; тел.: 8 (812) 499-64-70; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9706-6919).

Крицук Сергей Георгиевич – старший научный сотрудник лаборатории дистанционных методов геоэкологического мониторинга и геоинформатики (e-mail: sit.bloom@gmail.com; тел.: 8 (812) 499-64-68; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3781-322X).

Латыпов Искандер Шамильевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории дистанционных методов геоэкологического мониторинга и геоинформатики (e-mail: liscander@mail.ru; тел.: 8 (812) 499-64-68; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8653-7308).

Тронин Андрей Аркадьевич – доктор геолого-минералогических наук, директор НИЦЭБ РАН – обособленного структурного подразделения СПб ФИЦ РАН (e-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.ru; тел.: 8 (812) 499-64-54; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7852-8396).

Бузинов Роман Вячеславович – доктор медицинских наук, директор (e-mail: info@s-znc.ru; тел.: 8 (812) 655-62-26; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8624-6452).

Носков Сергей Николаевич – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник (e-mail: sergeinoskov@mail.ru; тел.: 8 (812) 717-96-60; ORCID: http://orcid.org//0000-0001-7971-4062).

Еремин Геннадий Борисович – кандидат медицинских наук, заведующий отделом гигиены, ведущий научный сотрудник (e-mail: info@s-znc.ru; тел.: 8 (812) 717-96-60; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1629-5435).

Борисова Дарья Сергеевна – младший научный сотрудник (e-mail: vyucheyskaya.ds@gmail.com; тел.: 8 (812) 717-96-60; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0694-5334).

В условиях потепления климата [1] возникает угроза безопасности и здоровью городских жителей вследствие роста смертности населения, связанной с развитием в крупных городах островов тепла и учащением прихода «волн тепла», существенно повышающих обычную температуру воздуха [2, 3]. Эти климатические явления во всем мире приводят к значительным экономическим ущербам из-за дополнительной смертности в результате перегрева, которые оцениваются в сумму от 6 до 88 млрд долларов США в год[1]. В последние десятилетия в крупных городах России наблюдается беспрецедентное повышение температуры воздуха по сравнению с окружающими сельскими районами. Это явление, известное как эффект городского острова тепла, объясняется несколькими факторами. Городской остров тепла является результатом высокого уровня антропогенного производства тепла, генерируемого промышленностью, транспортом и использованием энергии в быту. Кроме того, повышению температуры способствует снижение охлаждающего эффекта от испарения из-за отсутствия зеленых насаждений и от экранирования (запечатывания) дорожным покрытием испарения почвенной влаги. Другие факторы, способствующие возникновению городского острова тепла, включают концентрацию парниковых газов и интенсивный нагрев солнечным излучением металлических крыш с низкой тепловой инерцией. Эти факторы приводят к перегреву городских территорий по сравнению с пригородами. Установлено, что для каждого места существует оптимальная температура воздуха, в пределах которой наблюдается наименьшая смертность[2] [4–6]. В условиях потепления климата среднесуточная температура воздуха в городе чаще превышает порог температуры наименьшей смертности. Поэтому ежегодное число смертей, вызванных перегревом городской среды, растет. Этот вывод основан на статистически подтвержденных эпидемиологических исследованиях, продемонстрировавших корреляцию между относительным риском смертности и среднесуточной температурой воздуха [4, 5, 7].

Международная группа ученых, основываясь на изучении тенденций изменения температуры воздуха в период с 1984 по 2015 г., сделала несколько долгосрочных прогнозов относительно предполагаемых уровней дополнительной смертности в различных странах мира. Исследование раскрывает негативные перспективы для всех стран и призывает к разработке эффективных мер по защите и адаптации населения к повышению температуры [8]. Поэтому требуется разработка эффективных методов мониторинга смертности, вызванной перегревом (СВП), чтобы соответствующим образом адаптировать государственные стратегии. Периоды экстремальной жары оказывают более существенное влияние на смертность от цереброваскулярных заболеваний, чем от ишемической болезни сердца [9]. Кроме того, продолжительная жаркая погода приводит к росту смертности от сердечно-сосудистых заболеваний, особенно среди лиц старшего возраста [10]. Согласно метаанализу исследований, температура атмосферного воздуха и ее колебания имеют различное значение для развития метеопатических реакций. Так, масштабное исследование, проведенное в США в период с 2004 по 2008 г., проанализировало 7758 случаев и обнаружило, что невозможно окончательно определить влияние сезонных колебаний температуры, влажности и атмосферного давления на здоровье населения. Однако другие исследования обнаружили корреляцию между температурой воздуха и различными нарушениями здоровья. Например, обнаружена прямая связь между температурой воздуха и частотой ишемических инсультов [11]. Выявлена отрицательная корреляция между влажностью воздуха и частотой инсультов, а также обнаружена корреляция между ростом числа обращений за неотложной медицинской помощью по поводу заболеваний системы кровообращения, таких как сердечная аритмия, артериальная гипертензия и сердечная недостаточность, и более высокими температурами воздуха. Также было замечено, что t_m – температура минимальной смертности зависит от климатической зоны. У лиц, проживающих в южных широтах, t_m обычно выше, чем у лиц, проживающих в более холодных регионах[3] [12, 13]. Даже в пределах одного города могут наблюдаться значительные вариации среднесуточной температуры воздуха[4] [14–16]. В разных частях города температура воздуха может отличаться на несколько градусов. Это может привести к неравно-

[1] МР 2.1.10.0033-11. Оценка риска, связанного с воздействием факторов образа жизни на здоровье населения: методические рекомендации / утв. Руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации Г.Г. Онищенко 31 июля 2011 г. [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200111974?ysclid=mbows1mjec956425907 (дата обращения: 12.11.2024).

[2] ISO 7730: 2005. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria: International Standard. – 3rd ed. – 52 p.

[3] МР 2.1.10.0033-11.

[4] Bornstein R.D. Observations of the Urban Heat Island Effect in New York City // Journal of Applied Meteorology. – 1968. – Vol. 7, № 4. – P. 575–582.

мерному распределению показателей смертности от перегрева в различных частях городов [16, 17]. Для принятия городскими властями обоснованных решений по управлению рисками здоровью населения, создаваемыми перегревом городской среды, важно иметь подробную информацию о пространственном распределении удельного среднегодового экономического ущерба, вызванного преждевременной смертностью от перегрева. Учитывая, что управленческие решения должны базироваться на усредненных в многолетнем плане данных, оценки должны быть основаны на многолетнем анализе временных рядов температур в каждой элементарной площадке территории города, соответствующей пикселю на цифровой карте. С экономической точки зрения для этого целесообразно использовать архивные спутниковые данные, так как их анализ дает карты яркостных температур подстилающей поверхности в день съемки. Однако у этого подхода есть недостаток, поскольку из-за облачности сложно получать непрерывные временные ряды. Это может помешать созданию статистически репрезентативного распределения среднесуточных температур воздуха. Для устранения этого ограничения можно использовать несколько методов. Например, на момент спутниковой съемки с применением метода множественной корреляции результатов спутниковых съемок и данных синхронных наземных измерений различных характеристик городской среды строится карта температуры воздуха. Эти измерения включают, например, индекс растительности, высоту рельефа поверхности, расстояние от береговой линии и т. п. [18–22]. Одним из недостатков этого подхода является сложность создания статистически значимого количества карт, необходимых для оценки удельного риска перегрева.

Недавно появились публикации методик создания цифровых карт смертности в городах из-за перегрева на конкретную дату. Для этого использовались карты яркостных температур, полученных в результате тепловых космических съемок со спутников Terra/Aqua (MODIS), наземных измерений и других характеристик городской среды, а также статистические данные о количестве смертей в городах, произошедших при различной температуре воздуха [18–20]. Данный методический подход к созданию цифровой карты смертности имеет ограничения. Для принятия управленческих решений необходима более подробная пространственная информация, чем можно получить по сетке с разрешением 1×1 км. Кроме того, в данном случае цифровая карта создается на определенный момент времени. При этом чрезвычайно трудоемко построить статистически представительное количество цифровых карт за длительный период и, следовательно, невозможно получить потенциальные (усредненные в течение многолетнего периода) данные. Кроме того, измерение различных характеристик городской среды с использованием достаточно густой наземной наблюдательной сети значительно отодвигает горизонт получения результата.

Построение на базе математического моделирования большого количества карт температуры воздуха в городе возможно, но это потребует значительных вычислительных ресурсов и тщательной верификации модели.

В литературе описан новый метод спутникового картографирования температуры воздуха [15]. Этот метод объединяет результаты эпизодических спутниковых тепловых съемок (пространственные данные), выполненных в условиях безоблачной погоды, с данными длительного непрерывного мониторинга температуры воздуха на стандартных метеостанциях (временные ряды). Это позволяет картировать риск смертности населения и потенциального экономического ущерба от преждевременной смертности от перегрева [16]. Дальнейшее развитие этой методики привело к созданию методики спутникового картирования удельного потенциального экономического ущерба от преждевременной СВП в городах [17]. В результате на примере города Хельсинки (Финляндия) было продемонстрировано наличие пространственной неоднородности этих экономических ущербов, что обусловливает необходимость дифференцированного подхода к мерам, направленным на снижение угроз здоровью населения, вызванных потеплением климата. В принципе этот метод потенциально может быть использован в качестве инструмента для прогнозирования и смягчения экономического ущерба, связанного с перегревом городов в будущем. Но в настоящее время этот метод сложен в практической реализации из-за его высокой трудоемкости. Поэтому цель исследования – разработать упрощенный подход к спутниковому картированию СВП на примере двух мегаполисов, расположенных в разных климатических зонах, но с близким по численности населением, и изучить общие черты пространственного распределения СВП по отношению к основным функциональным зонам этих городов.

Материалы и методы. Основным принципом создания карты риска преждевременной смертности и удельного потенциального экономического ущерба от смертности, вызванной перегревом $l\ (x, y)$, является выявление корреляций между $T\ (x, y)$ – яркостными температурами поверхности земли на (x, y) – каждой элементарной площадке территории (соответствует пикселю на цифровой карте) и $t\ (\tau)$ – срочной температурой воздуха, регистрируемой на метеостанции в τ – определенный момент времени.

Эпидемиологические исследования показали, что в городах, где t – среднесуточная температура

воздуха повышается относительно многолетних данных, увеличивается и смертность населения. Ежедневная смертность $\mu_M(t)$, ‰/сут, рассчитывается как $\mu_M(t) = M_M(t)/(N \cdot 10^{-3})$, где N – количество жителей в городе. Годовой уровень смертности $\bar{\mu}_M$ определяется как годовое число смертей в городе, приходящееся на 1000 жителей.

Аппроксимация данных медицинской статистики (рис. 1) позволяет предположить, что при $t \geq t_m$, где t_m – температура минимальной смертности, ºС, температурная зависимость $\mu_M^+(t)$ – суточная смертность от перегрева в городе, ‰/сут (нижний индекс «*M*» обозначает медицинскую статистику), может быть представлена квадратичной функцией:

$$\mu_M^+(t) = \mu_M(t) - \mu_M(t_m) = \gamma \cdot (t - t_m)^2, \quad t > t_m, \qquad (1)$$

где $\mu_M(t_m)$ – смертность от всех причин, ‰/сут, при t_m – температуре минимальной смертности в предположении, что за 20-летний период, в течение которого проводилась спутниковая съемка, смертность в исследуемом городе не изменялась, γ – коэффициент.

В рамках аппроксимации (1) задача спутникового картирования смертности может быть сведена к составлению $\bar{\mu}_S^+(x,y)$, ‰/ (км^2 · год) – карт статистически усредненных (потенциальных) годовых удельных показателей смертности от перегрева, по спутниковым данным для элементарной площадки (x, y), соответствующей площади пикселя. Другими словами, необходимо $\bar{\mu}_M^+$, ‰/год – годовые значения смертности от перегрева в городе распределить по всей площади города.

Поиск решения этого вопроса затруднен тем, что информация о среднесуточной температуре воздуха имеется только на метеостанциях. Единственные данные, которые можно использовать для определения уровня смертности в городе, – это $T(x,y,i)$ – яркостная температура, К, земной поверхности, картируемая космической тепловой съемкой спутниками серии Landsat. Эти данные доступны в любой точке города. На основании этой информации можно предположить, что $\bar{\mu}_M^+(x,y)$ – удельную смертность от перегрева на элементарной площадке с координатами $x = 1,\ldots,X$; $y = 1,\ldots,Y$, в i-й день можно аппроксимировать как:

$$\bar{\mu}_M^+(x,y,i) = \beta \cdot \left[n(x,y) \cdot T(x,y,i) - T_* \right]^2, \qquad (2)$$

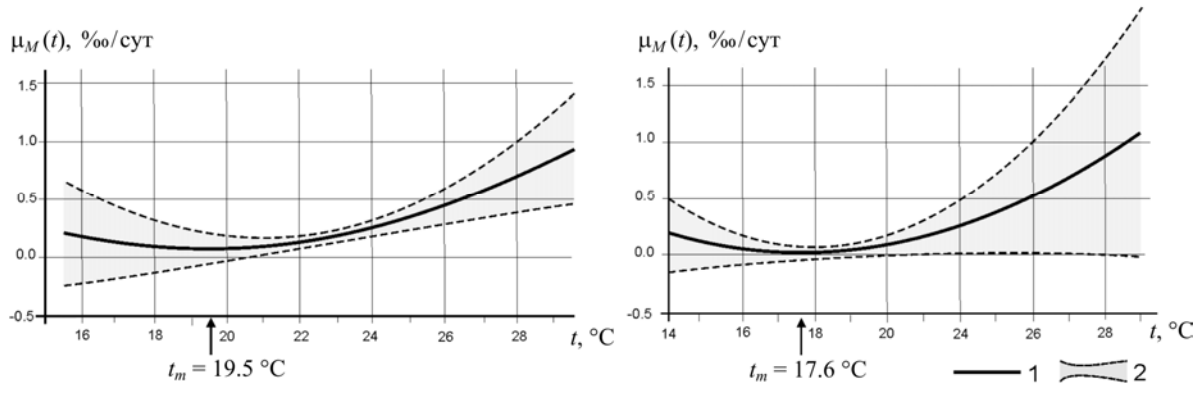
где β_i – коэффициент;

$n(x,y)$ – плотность населения, жителей на (x, y) – элементарной площадке, чел./км^2, которая, как и температура поверхности, влияет на значение смертности; T_* – некая постоянная яркостная температура подстилающей поверхности, определяемая по результатам всех спутниковых съемок (аналог t_m), К.

Далее суммируем (2) по всем координатам, что позволяет использовать данные смертности, полученные из медицинской статистики:

$$\mu_M^+(i) = \beta \cdot S(i), \qquad (3)$$

где $S(i) = \sum_{x=1;\, y=1}^{X,Y} n(x,y) \cdot \left[T(x,y,i) - T_* \right]^2$, и T_* – постоянная, определяемая на основе анализа материалов спутниковых съемок (рис. 2 и 3).



а *б*

Рис. 1. Аппроксимация зависимости $\bar{\mu}_S^+(i)$ от t: *а* – Ростов на Дону: $\mu_M^+(t) = 0{,}012t^2 - 0{,}4225t + 3{,}7482$; *б* – Омск: $\mu_M^+(t) = 0{,}0082t^2 - 0{,}3255t + 3{,}2359$ (условные обозначения: *1* – аппроксимация; *2* – доверительные интервалы с вероятностью 90 %)

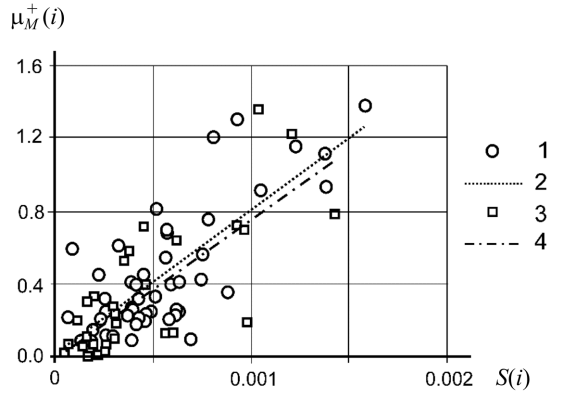


Рис. 2. Зависимость $\mu_M^+(i)$ от $S(i)$. Значение T_* выбирается для максимального значения R^2 (см. рис. 3). (условные обозначения: Ростов-на-Дону: *1* – значения $\bar{\mu}_M(i)$ – смертности в день съемки; *2* – линия регрессии по всем значениям смертности в дни спутниковых съемок, $i = 1, \ldots, I$.; Омск: *3* – значения $\bar{\mu}_M(i)$ – смертности в день съемки; *4* – линия регрессии по всем значениям смертности в дни спутниковых съемок, $i = 1, \ldots, I$)

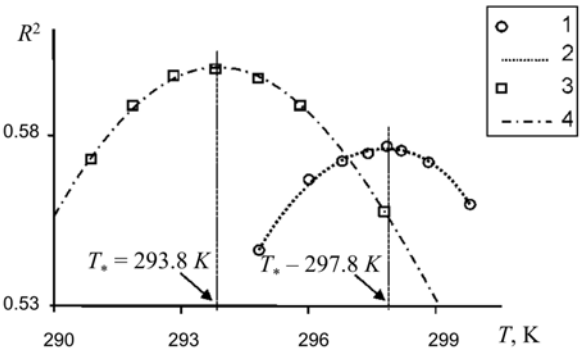


Рис. 3. Определение параметра T_* (условные обозначения: Ростов-на-Дону: *1* – значения $\bar{\mu}_M(i)$ – смертности в день съемки; *2* – регрессия по всем значениям $\bar{\mu}_M(i)$ при $i = 1, \ldots, I$; Омск: *3* – значения $\bar{\mu}_M(i)$ – смертности в день съемки; *4* – регрессия по всем значениям $\bar{\mu}_M(i)$ при $i = 1, \ldots, I$)

Далее предположим, что β постоянна. То есть $\mu_M^+(i)$ зависит только от метеоусловий на дату съемки. Поэтому построим регрессионную модель $\mu_M^+(i)$ на основе всех материалов спутниковых съемок (всех *i*).

Параметр T_* выбирается путем минимизации отношения стандартного отклонения β – наклона к его среднему значению (см. рис. 2), что соответствует максимальному значению R^2 для уравнения регрессии (см. рис. 3).

Таким образом, коэффициент β определяется по регрессии (см. рис. 2).

Далее $\hat{\mu}_M^+$ – значение смертности от перегрева во всем городе, ‰/сут, по данным медицинской статистики, осредненное по всем дням, когда выполнялась спутниковая съемка, может быть представлено как

$$\hat{\mu}_M^+ = \left[\sum_{i=1}^{K} \mu_M^+(i)\right] / K. \qquad (4)$$

После чего $\hat{\mu}_S^+(x,y)$ – удельная смертность от перегрева на (x, y) – элементарной площадке, осредненная по всем дням, когда выполнялась спутниковая съемка, ‰/сут, рассчитывается для каждого дня, когда выполнялась съемка с использованием $T(x,y)$ – значений яркостной температуры, измеренной по данным спутниковой съемки для каждой элементарной площадки с координатами (x, y):

$$\hat{\mu}_S^+(x,y) = \{\beta \cdot \sum_{i=1}^{K} n(x,y) \cdot [T(x,y,i) - T_*]^2\} / K. \qquad (5)$$

Далее $\varphi(x,y)$ – коэффициент, показывающий, во сколько раз смертность на площадке с координатами (x,y) отличается от полной смертности в городе, может быть представлен как:

$$\varphi(x,y) = \hat{\mu}_S^+(x,y) / \hat{\mu}_M^+ . \qquad (6)$$

Отсюда среднегодовая удельная смертность на (x,y) – элементарной площадке:

$$\bar{\mu}_S^+(x,y) = \varphi(x,y) \cdot \bar{\mu}_M^+ , \qquad (7)$$

где $\bar{\mu}_S^+(x,y)$ и $\bar{\mu}_M^+$, ‰/(год · км^2) – потенциальные смертности от перегрева соответственно по данным спутникового картирования и медицинской статистики.

Затем $\bar{M}_S^+(x,y)$ – удельное среднегодовое количество смертей от перегрева по данным спутниковых съемок в пределах (x, y) – элементарной площадки, смертей/(год · км^2) может быть представлено в виде:

$$\bar{M}_S^+(x,y) = \bar{\mu}_S^+(x,y) \cdot n(x,y) \cdot 10^{-3} , \qquad (8)$$

где $n(x,y)$ – плотность населения на элементарной площадке (x, y). Отсюда, по спутниковым данным, $\bar{M}_S^+(A)$ – среднегодовое количество смертей от перегрева по данным спутниковой съемки, смертей/год, на части города с площадью *A*:

$$\bar{M}_S^+(A) = \sum_{x,y}^{A} \bar{M}_S^+(x,y) . \qquad (9)$$

При анализе результатов полезно иметь представление о $r(x,y)$ – риске (вероятности) превышения среднесуточной температурой воздуха порога t_m –

температуры минимальной смертности. Для картирования этого риска была применена ранее разработанная методика [16], предусматривающая определение для каждой элементарной площадки корреляции между $T(x, y)$ – яркостной температурой подстилающей поверхности и t – среднесуточной температурой воздуха, измеренной на метеостанции:

$$r(x,y) = \sum_{j \to t_m}^{i=J} p_j\left[t_{eq}(x,y)\right], \qquad (10)$$

где $p_j\left[t_{eq}(x,y)\right]$ – встречаемость $t_{eq}(x,y)$ – эквивалентной температуры в j-м интервале разбиения гистограммы (bin), где $j = 1,\ldots, J$ – номер интервала.

$t_{eq}(x,y)$ – эквивалентная температура, °С, это среднесуточная температура воздуха на метеостанции, которая соответствовала $T(x,y,i)$ – яркостной температуре в момент спутниковой съемки, проведенной в i-й день.

Ширина интервала для температур воздуха с метеостанции бралась равной 1 °С, начиная с $t_{eq} = 0$ °С до t_{max} – максимальной исторически зарегистрированной на метеостанции среднесуточной температуры воздуха. В результате находилось уравнение регрессии:

$$t = t_{eq}(x,y,i) = a \cdot T(x,y,i) + b. \qquad (11)$$

Так как имеет место линейное преобразование температур, то становится возможным и линейное преобразование статистического распределения:

$$p_j\left[t_{eq}(x,y)\right] = a(x,y) \cdot p_j(t) + b(x,y).$$

Исходя из (9), расчет $l(x,y)$ – среднегодового удельного экономического ущерба от преждевременной смертности, вызванной перегревом, руб./(км^2 · год), учитывая, что ε – экономический ущерб от одной преждевременной смерти от перегрева, руб./смерть, выполняется в соответствии с (12):

$$l(x,y) = \varepsilon \cdot \bar{M}_S^+(x,y). \qquad (12)$$

Окончательно: $L(A)$ – полный среднегодовой экономический ущерб (потенциальный экономический ущерб) от преждевременной смертности, вызванной перегревом в пределах участка города A, осредненный за весь период спутниковых съемок, руб/год, рассчитывается как:

$$L(A) = \varepsilon \cdot \bar{M}_S^+(A). \qquad (13)$$

Объекты исследования. Для разработки упрощенной методики спутникового картирования рисков смертности и связанных с нею экономических потерь выбраны два крупных города с разными условиями жизни, расположенные в различных климатических зонах России: Ростов-на-Дону и Омск. На рис. 4 показано местоположение этих городов на карте-схеме зонирования территории России по условиям жизни населения. В табл. 1 приведены основные характеристики этих городов, необходимые для понимания медико-климатической ситуации в исследуемых городах.

Для решаемых задач использовались данные летних съемок спутниками серии Landsat (табл. 2). Температурная чувствительность спутника Landsat 7 была не хуже 0,3 К, а исходное пространственное разрешение составляло 60 м (при обработке преобразовано в 30 м)[5] [24]. Температурная чувствительность спутника Landsat 8 составляет 0,4 К при фоновой температуре 300 К с пространственным разрешением 100 м. Кроме того, использованы срочные летние наблюдения за температурой воздуха на метеостанциях сети Всемирной метеорологической организации (ВМО) за весь период получения спутниковых материалов (табл. 2).

Для анализа результатов исследования использовались карты функциональных зон[6].

Информацию о плотности населения в городах получали из цифровой карты плотности населения мира, созданной Европейским союзом[7]. Кроме того,

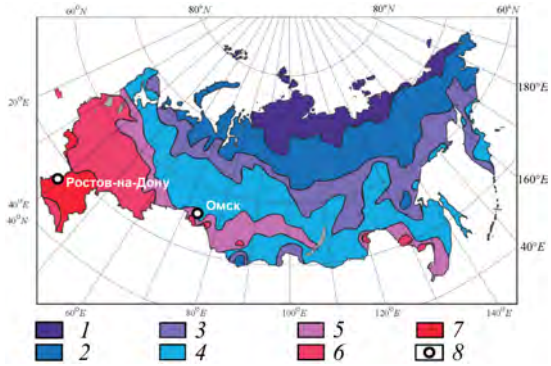


Рис. 4. Карта районирования территории России по условиям жизни населения [6]. Эпоха: 2001–2010 гг. (условные обозначения: *1* – абсолютно неблагоприятная зона; *2* – очень неблагоприятная зона; *3* – неблагоприятная зона; *4* – условно неблагоприятная зона; *5* – условно благоприятная зона; *6* – благоприятная зона; *7* – наиболее благоприятная зона)

[5] Landsat 7 (L7) Data Users Handbook. Version 2.0. – South Dakota, Sioux Falls: EROS, 2019. – 139 p.

[6] Омск [Электронный ресурс] // World Population Density. – URL: https://luminocity3d.org/WorldPopDen/#10/51.0280/34.8335 (дата обращения: 16.11.2024); Генеральный план Ростова-на-Дону [Электронный ресурс] // Ростов-на-Дону: Официальный портал городской Думы и Администрации города. – URL: https://rostov-gorod.ru/administration/structure/departments/daig/action/01-grado-01-genplan/ (дата обращения: 16.11.2024).

[7] World Population Density [Электронный ресурс]. – URL: https://luminocity3d.org/WorldPopDen/ (дата обращения: 16.11.2024).

Таблица 1

Характеристики городов

№	Название	Население, чел.	Площадь города / площадь зеленых зон, км^2	Широта, градусы	Средняя температура воздуха в июле, °С
1	Ростов на Дону	1 142 000	348 / 77	47°14’ N	24,0
2	Омск	1 126 000	578 / 130	54°56’ N	19,6

Таблица 2

Использованные материалы спутниковых съемок и метеорологические данные

№	Город	Спутник	Количество сцен	Эпоха дд.мм.гггг	Источник данных	Код метеостанции в ВМО
1	Ростов на Дону	Landsat 7 Landsat 8	37 26	31.07.2000– 30.08.2022	https://earthexplorer.usgs.gov	34730
2	Омск	Landsat 7 Landsat 8	10 34	01.06.2013– 25.08.2022	https://earthexplorer.usgs.gov	28698

были использованы данные об экономических потерях от одной преждевременной смерти в каждом из исследуемых городов. Для Ростова-на-Дону оценочный ущерб составил 1,3 млн руб./смерть, а в Омске – 1,4 млн руб./смерть [23].

Исходные данные о суточной смертности в отдельных городах предоставлены Институтом экономического прогнозирования РАН и Федеральной службой по защите прав потребителей и благополучия человека.

На рис. 5 приведена схема информационных потоков при картировании показателей по данным многократных спутниковых съемок. Схема основана на изложенной выше теоретической части.

Результаты и их обсуждение. С использованием предложенных подходов составлены детальные карты риска превышения порога минимальной смертности вследствие возрастания температуры воздуха (рис. 6, *в* и 7, *в*).

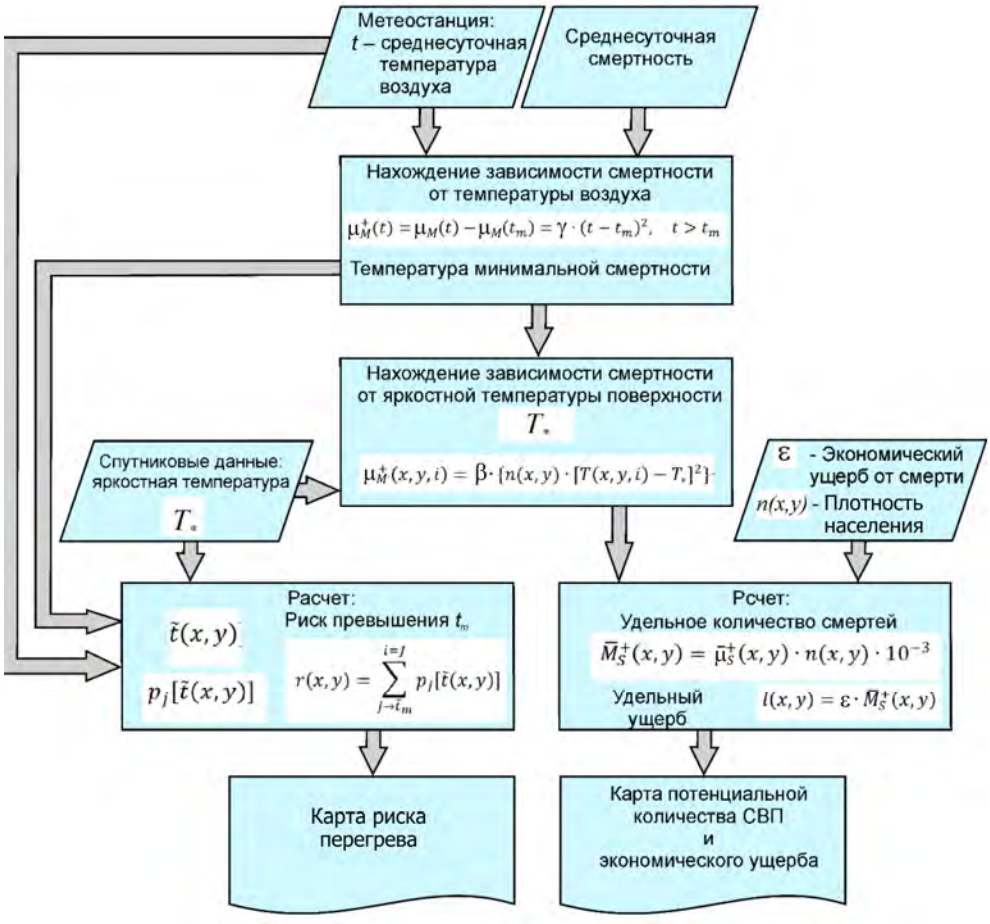


Рис. 5. Схема информационных потоков при спутниковом картировании рисков и СВП

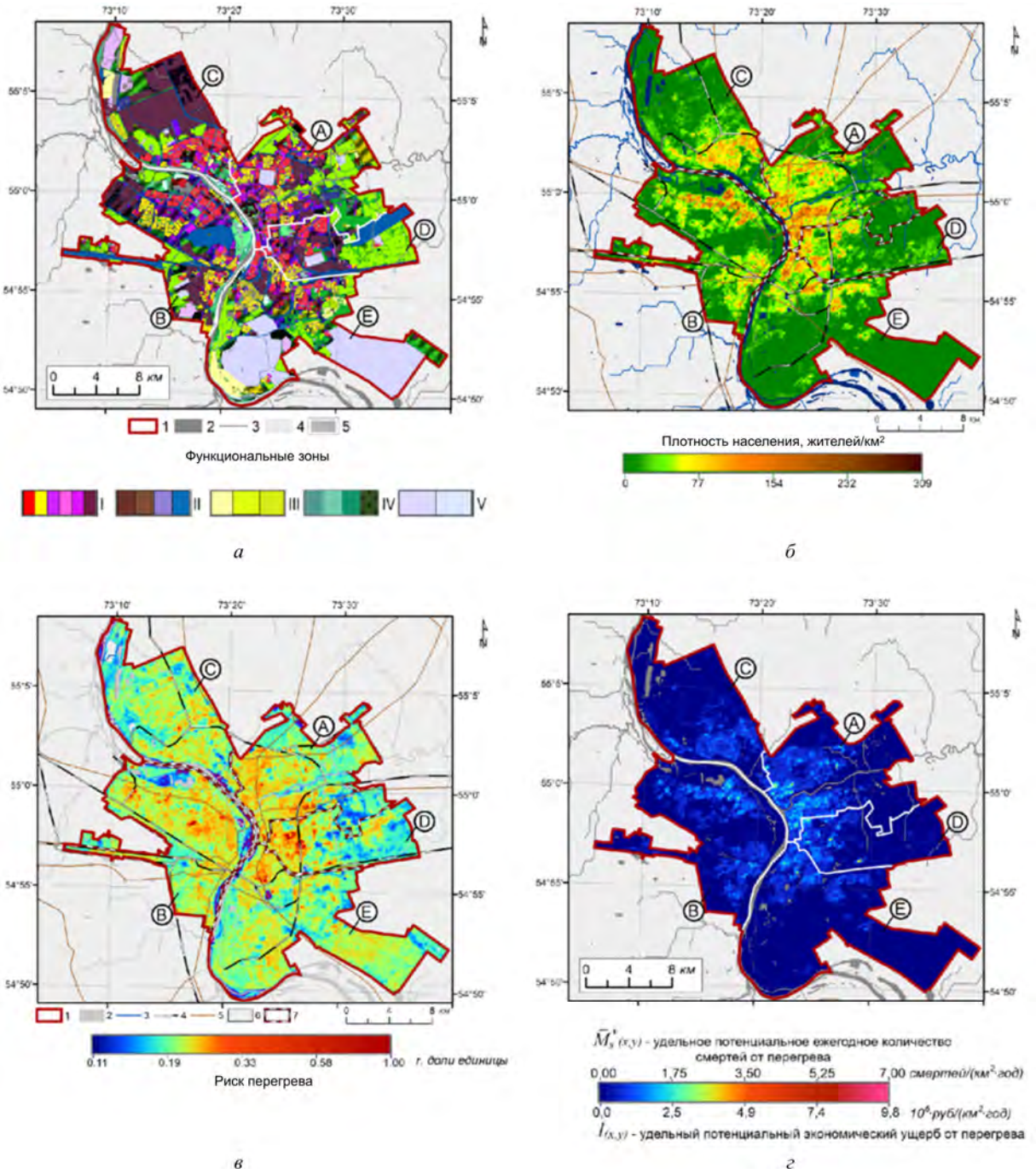


Рис. 6. Спутниковые карты г. Омска (Россия) (условные обозначения внизу карты: *1* – граница города; *2* – акватории; *3* – реки; *4* – железные дороги; *5* – автомобильные дороги; *6* – пригород; *7* – границы муниципальных районов. Заглавными буквами в кружках обозначены муниципальные районы: A – Центральный, B – Кировский, C – Советский, D – Октябрьский, E – Ленинский): *а* – упрощенная схема функциональных зон (условные обозначения отмечены римскими цифрами: I – здания (жилые малоэтажные, высотные, общественно-деловые, многофункциональные, исторические), II – промышленная и транспортная инфраструктура, III – территории хранения и утилизации мусора, IV – рекреационные, садоводческие, кладбища, V – территории ограниченного доступа, VI – пруды); *б* – цифровая карта плотности населения (эпоха: 2020 г.); *в* – цифровая карта $r(x,y)$ – риска перегрева; *г* – цифровая карта $\bar{M}_S^+(x,y)$ – удельного количества смертей от перегрева и $l(x,y)$ – экономических ущербов, вызванных преждевременной смертностью от перегрева

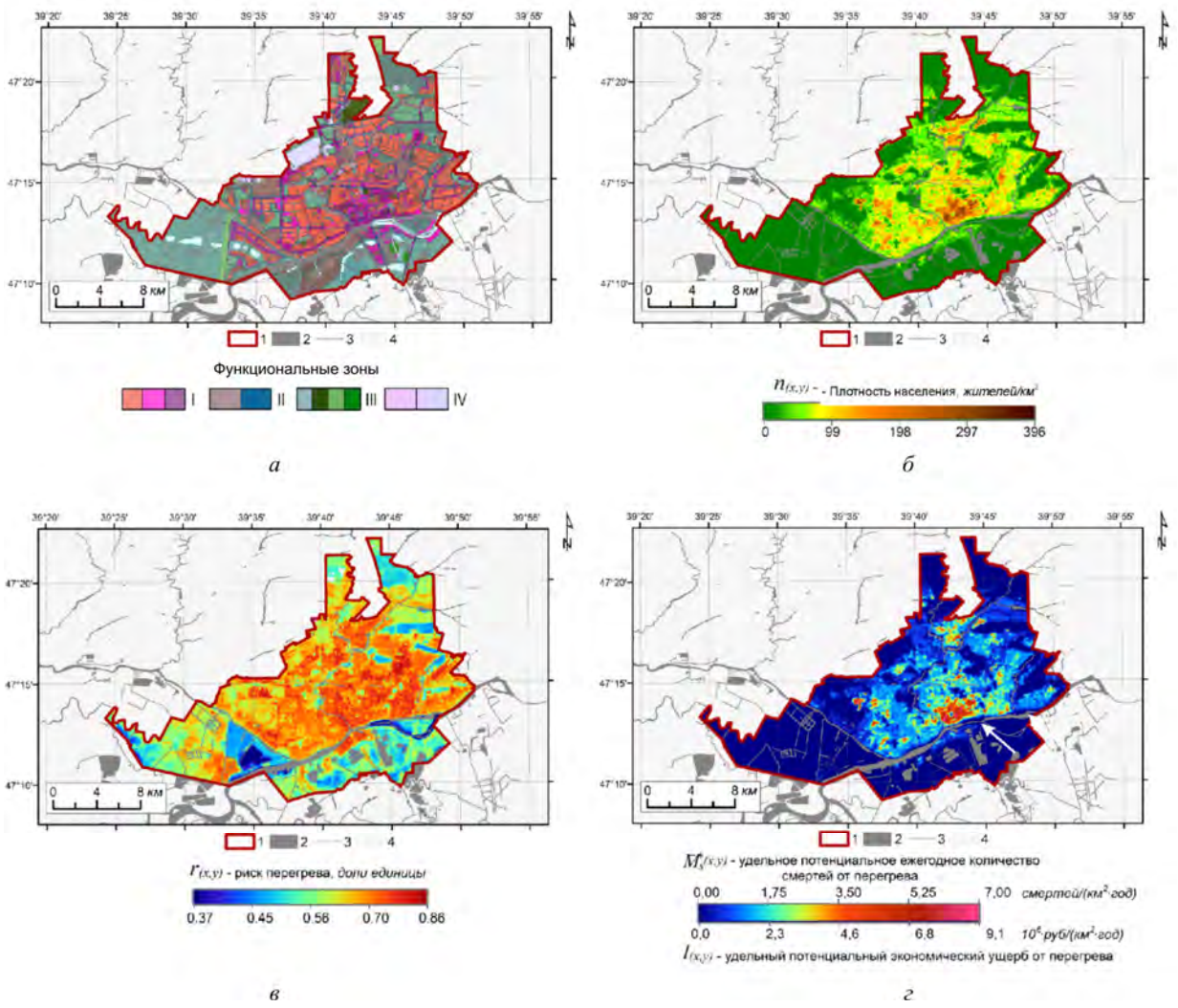


Рис. 7. Спутниковые карты города Ростова-на-Дону (Россия) (условные обозначения внизу карты на рис. А: *1* – граница города, *2* – акватории, *3* – реки, *4* – пригород): *а* – упрощенная схема функциональных зон (условные обозначения отмечены римскими цифрами: I – здания жилые, общественно-деловые, многофункциональные, исторические, II – промышленная и транспортная инфраструктура, III – территории хранения и утилизации мусора, IV – рекреационные, садоводческие, кладбища, V – территории ограниченного доступа, VI – пруды); *б* – цифровая карта *n* (*x*, *y*) – плотности населения (2020 г.); *в* – цифровая карта *r* (*x*, *y*) – риска перегрева; *г* – цифровая карта $\overline{M}_S^+(x,y)$ – удельного количества смертей от перегрева и *l* (*x*, *y*) – удельных экономических ущербов, вызванных преждевременной смертностью от перегрева

Теоретические исследования были верифицированы на примере г. Омска, поскольку статистические данные о смертности были доступны не только по всему городу, но и по отдельным его районам. Это позволило оценить относительные погрешности методики для разных районов города (табл. 3).

Стоит отметить, что в таких районах Омска, как Советский, Кировский и Ленинский, относительные погрешности не превышали 15 %. Это можно считать удовлетворительным результатом, учитывая, что данные территории имеют низкую плотность населения. Тем не менее районы с более высокой плотностью населения, такие как Центральный (A на рис. 6) и Октябрьский (D на рис. 6), имели относительные ошибки в пределах от 17 до 42 %. Эти результаты позволяют предположить, что относительная погрешность картирования смертности и экономических потерь остается в пределах 20 %, что в целом приемлемо для экономических оценок. Анализ всех спутниковых карт (см. рис. 6, *в*, 6, *г*; 7, *в*, 7, *г*) показывает, что риски перегрева, потенциальной смертности и экономического ущерба неравномерно распределены в пределах исследованных городов. Повышенный потенциальный уровень смертности сконцентрирован в районах, где высокая плотность населения сочетается с более высоким риском перегрева. Эта закономерность наиболее очевидна в исторических районах, таких

как центральные районы Омска и Ростова-на-Дону. И, наоборот, на территориях с высоким риском перегрева, но низкой плотностью населения наблюдается минимальная смертность. Например, в Ленинском районе Омска, в пределах территорий складирования и захоронения отходов, где нет постоянных жителей и, следовательно, нет смертности от перегрева. Следует отметить, что получение более точных данных о смертности представляет собой проблему из-за сложности учета жителей, которые могут присутствовать на рабочих местах, имеющих иной температурный режим, чем место их проживания. Поэтому для совершенствования данной технологии может оказаться необходимым учитывать ежедневные модели миграции населения.

Спутниковые карты потенциальной смертности при сравнении с данными медицинской статистики обнаруживают заметные различия: примерно 10 % в Омске и 4 % в Ростове-на-Дону (табл. 4). Эти различия объясняются ошибками, возникающими в результате процесса статистического усреднения, используемого в алгоритме.

Сравнение рис. 4, 6 и 7 дает интересный результат. Омск расположен на границе условно-благополучной и условно-неблагоприятной зон, а Ростов-на-Дону – в наиболее благоприятной зоне. При этом СВП выше в Ростове-на-Дону по сравнению с Омском (см. табл. 4 и рис. 6 и 7). Это явление можно объяснить тем, что карта районирования территории России (см. рис. 4) создавалась на основе усреднения нескольких зональных показателей, которые впоследствии были скорректированы азональными факторами. Температурный показатель был лишь одним из многих факторов, а потому не являлся решающим фактором при определении районирования.

Дальнейшее развитие этой методики может включать использование других характеристик состояния городской среды. Известно, что за последние десятилетия глобальная температура повысилась, что привело к увеличению количества осадков на суше. С возрастанием количества осадков и температуры, вероятно, также повысится уровень абсолютной влажности воздуха. Это может иметь последствия для общественного здоровья, поскольку более высокий уровень влажности воздуха и высокая температура могут вызвать рост смертности.

Практическая значимость детального картирования экономических потерь от смертности, вызванной перегревом, иллюстрируется следующим примером. Снижения смертности в городе в условиях изменения климата можно добиться за счет реализации различных технических решений, таких как формирование зеленых зон, использование отражающих поверхностей, установка «холодных» металлических крыш. Например, стоимость перевода обычных крыш в «холодные» в настоящее время колеблется от 60 до 150 долларов за квадратный метр [25]. Таким образом, замена одного квадратного километра обычных крыш на «холодные» будет стоить от 60 до 150 млн долларов. Это значительная сумма, превышающая предполагаемый годовой

Таблица 3

Результаты оценки погрешностей спутникового картирования СВП в г. Омске

Районы Омска			Среднегодовое количество смертей от СВП, смертей/год		Относит. ошибка спутникового картирования кол-ва смертей, %
Буквы, маркирующие районы на рис. 6	Названия районов	Население, чел.	Мед. статистика	Спутниковое картирование	
A	Центральный	245 578	17	20	+17
B	Кировский	248 209	19	16	-15
C	Советский	204 001	11	10	-9
D	Октябрьский	271 440	14	8	-42
E	Ленинский	156 467	11	10	-9
Весь город:		1 126 000	72	64	-11

Таблица 4

Сравнение основных потенциальных среднегодовых характеристик СВП в Омске и Ростове-на-Дону

Потенциальные среднегодовые характеристики	Омск	Ростов-на-Дону
Количество смертей по данным медицинской статистики, смертей/год	72	152
Количество смертей по данным спутникового картирования, смертей/год	64	146
Смертность по данным медицинской статистики, ‰/год	0,063	0,133
Смертность по данным спутникового картирования, ‰/год	0,057	0,123
Экономический ущерб от СВП по данным медицинской статистики: Весь город, млн руб. / год Средняя удельная по городу, млн руб. / (год·км^2)	 101 0,17	 198 0,34
Потенциальный экономический ущерб от СВП по результатам спутникового картирования, млн руб./год	90	190

экономический ущерб от СВП в Ростове-на-Дону, который составляет 2,19 млн долларов. Учитывая, что срок службы типичной кровли составляет около 40 лет, общая стоимость реализации устойчивых кровельных решений за 40-летний период будет сопоставима с экономическим эффектом от установки «холодных» крыш в Ростове-на-Дону. Необходимо отметить, что внедрение «холодных» крыш может также способствовать снижению затрат на отопление и охлаждение домов [25]. Поскольку города стремятся устранить риски для здоровья населения, связанные с изменением климата, целесообразно инвестировать в меры, которые сводят к минимуму воздействие городского острова тепла, особенно в муниципальных районах с более высоким уровнем смертности. В случае Ростова-на-Дону это центральный район, обозначенный стрелкой на рис. 7, *г*, занимающий примерно 8 км^2 города (из общей площади города 350 км^2). Спутниковые карты потенциальных экономических потерь от СВП могут позволить городским властям эффективно распределять бюджеты, концентрируясь на тех областях, где выгоды от таких мер будут наиболее эффективными.

Кроме того, эта информация может помочь в улучшении медицинских услуг в районах с высоким риском СВП, особенно для уязвимых групп населения, таких как пожилые люди в возрасте 60 лет и старше и люди с хроническими заболеваниями, особенно сердечно-сосудистыми. Такой целенаправленный подход мог бы помочь снизить воздействие перегрева окружающей среды на эти группы и улучшить общие показатели их здоровья. Поэтому для принятия эффективных административных мер, направленных на снижение рисков, связанных с потеплением климата, крайне важно иметь детальные карты, иллюстрирующие потенциальную смертность и экономические потери от СВП. Особенно это актуально для крупных городов с населением более миллиона человек. Приняв этот подход, градостроители смогут активно решать растущие проблемы, связанные с изменением климата, обеспечивая защиту здоровья населения и повышая устойчивость города.

Выводы:

1. На базе сопряжения спутниковой технологии дистанционного зондирования Земли, эпидемиологических данных и методов математического моделирования предложена методика картирования рисков перегрева воздуха, преждевременной смертности и экономических потерь в городе для информационной поддержки принятия решений, направленных на смягчение потенциального вреда здоровью населения в крупных городах из-за последствий, связанных с изменением климата.

2. Результаты применения предложенных подходов к спутниковому картированию перегрева и им вызванной смертности на примере Омска и Ростова-на-Дону указывают относительные погрешности в ~ 20 % в ежегодных потенциальных значениях смертности и экономических потерь. Эти уровни ошибок находятся в пределах допустимого диапазона для городского планирования и принятия управленческих решений, связанных с защитой здоровья населения в условиях изменения климата.

3. Выявлена неравномерность распределения в пределах городов потенциальных удельных СВП и соответствующих им экономических потерь. Более высокие показатели сконцентрированы в районах с более высокой плотностью населения, в то время как жители территорий с низкой плотностью населения, такие как промышленные зоны, зеленые зоны и рекреационные зоны, испытывают минимальное воздействие потепления климата. Сосредоточение внимания на районах с высокой плотностью населения представляет собой жизнеспособную стратегию решения проблем общественного здравоохранения, связанных с изменением климата.

4. Возрастающая значимость геопространственных данных для экономики, общества и окружающей среды определяется ее ролью информационной поддержки процессов принятия решений, зависящих от пространственно-распределенной экономической информации. Это представляет собой перспективное направление для спутниковой технологии дистанционного зондирования Земли.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках бюджетной темы Министерства науки и образования Российской Федерации: «Научные основы оценки здоровья экосистем Северо-Запада России и предупреждение угроз экологической безопасности». Код ФФЗФ-2022-0011.

В рамках плана научных исследований Северо-Западного научного центра общественного здравоохранения на 2021–2025 гг. с учетом национального плана мероприятий второго этапа адаптации к изменению климата до 2025 г.

Конфликт интересов. Авторы статьи заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Global warming of 1.5 °C: Special Report / M.R. Allen, O.P. Dube, W. Solecki, F. Aragón-Durand, W. Cramer, S. Humphreys, M. Kainuma, J. Kala [et al.] // IPCC. – 2018. – 616 p.

2. Heat-waves: risks and responses / C. Koppe, S. Kovats, G. Jendritzky, B. Menne. – Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2004. – 123 p.

3. Evolution of the local climate in Montreal and Ottawa before, during and after a heatwave and the effects on urban heat islands / C. Shu, A. Gaur, L. Wang, M.A. Lacasse // Sci. Total Environ. – 2023. – Vol. 890. – P. 164497.

4. Biometeorological Assessment of Mortality Related to Extreme Temperatures in Helsinki Region, Finland 1972–2014 / R. Ruuhela, K. Jylha, T. Lanki, P. Tiittanen, A. Matzarakis // Intern. J. Environ. Res. Public Health. – 2017. – Vol. 14, № 8. – P. 944. DOI: 10.3390/ijerph14080944

5. Температура воздуха и смертность: исследование пороговых значений жары и чувствительности населения на примере г. Ростов-на-Дону / Н.В. Шартова, Д.А. Шапошников, П.И. Константинов, Б.А. Ревич // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2019. – Т. 2. – С. 66–94. DOI: 10.21513/2410-8758-2019-2-66-94

6. Виноградова В.В., Золотокрылин А.Н. Современные и ожидаемые изменения роли климатического фактора в оценке природных условий жизни населения в Российской Федерации // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2014. – № 4. – С. 16–21. DOI: 10.15356/0373-2444-2014-4-16-21

7. Andrade C. Understanding relative risk, odds ratio, and related terms: as simple as it can get // J. Clin. Psychiatry. – 2015. – Vol. 76, № 7. – P. e857–e861. DOI: 10.4088/JCP.15f10150

8. Quantifying excess deaths related to heatwaves under climate change scenarios: A multicountry time series modelling study / Y. Guo, A. Gasparrini, S. Li, F. Sera, A.M. Vicedo-Cabrera, M. de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, P.H. Nascimento Saldiva, E. Lavigne [et al.] // PLoS Med. – 2018. – Vol. 15, № 7. – P. e1002629. DOI: 10.1371/journal.pmed.1002629

9. Contrasting patterns of hot spell effects on morbidity and mortality for cardiovascular diseases in the Czech Republic, 1994–2009 / H. Hanzlíková, E. Plavcová, J. Kynčl, B. Kříž, J. Kyselý // Int. J. Biometeorol. – 2015. – Vol. 59, № 11. – P. 1673–1684. DOI: 10.1007/s00484-015-0974-1

10. Urban A., Davídkovova H., Kysely J. Heat- and cold-stress effects on cardiovascular mortality and morbidity among urban and rural populations in the Czech Republic // Int. J. Biometeorol. – 2014. – Vol. 58, № 6. – P. 1057–1068. DOI: 10.1007/s00484-013-0693-4

11. Meteorological Factors and Seasonal Stroke Rates: A Four-year Comprehensive Study / A. Salam, S. Kamran, R. Bibi, H.M. Korashy, A. Parray, A.A. Mannai, A.A. Ansari, K.K. Kanikicharla [et al.] // J. Stroke Cerebrovasc. Dis. – 2019. – Vol. 28, № 8. – P. 2324–2331. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2019.05.032

12. Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study / Q. Zhao, Y. Guo, T. Ye, A. Gasparrini, S. Tong, A. Overcenco, A. Urban, A. Schneider [et al.] // Lancet Planet. Health. – 2021. – Vol. 5, № 7. – P. e415–e425. DOI: 10.1016/S2542-5196(21)00081-4

13. Ревич Б.А., Григорьева Е.А. Риски здоровью российского населения от погодных экстремумов в начале XXI в. Часть 1. Волны жары и холода // Проблемы анализа риска. – 2021. – Т. 18, № 2. – С. 12–33. DOI: 10.32686/1812-5220-2021-18-2-12-33

14. Спутниковое картирование риска перегрева поверхности городской среды (на примере Санкт-Петербурга) / С.Г. Крицук, В.И. Горный, И.Ш. Латыпов, А.А. Павловский, А.А. Тронин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 5. – С. 34–44. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-34-44

15. Satellite mapping of air temperature under polar night conditions / S. Kritsuk, V. Gornyy, T. Davidan, I. Latypov, A. Manvelova, P. Konstantinov, A. Tronin, M. Varentsov, M. Vasiliev // Geo-spatial Information Science. – 2022. – Vol. 25, № 2. – P. 325–336. DOI: 10.1080/10095020.2021.2003166

16. Satellite Mapping of Urban Air Overheating Risk (Case Study of Helsinki, Finland) / V.I. Gornyy, S.G. Kritsuk, I.Sh. Latypov, A.B. Manvelova, A.A. Tronin // Cosmic Res. – 2022. – Vol. 60, Suppl. 1. – P. S38–S45. DOI: 10.1134/S0010952522700058

17. Спутниковое картирование экономического ущерба от смертей городского населения, вызванных перегревом (на примере г. Хельсинки, Финляндия) / В.И. Горный, С.Г. Крицук, И.Ш. Латыпов, А.А. Тронин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 35–46. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-35-46

18. Srivanit M., Hokao K. Thermal Infrared Remote Sensing for Urban Climate and Environmental Studies: An Application for the City of Bangkok, Thailand // JARS. – 2012. – Vol. 9, № 1. – P. 83–100. DOI: 10.56261/jars.v9i1.168598

19. Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands / A. Smargiassi, M.S. Goldberg, C. Plante, M. Fournier, Y. Baudouin, T. Kosatsky // J. Epidemiol. Community Health. – 2009. – Vol. 63, № 8. – P. 659–664. DOI: 10.1136/jech.2008.078147

20. Ho H.C., Knudby A., Huang W. A Spatial Framework to Map Heat Health Risks at Multiple Scales // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2015. – Vol. 12, № 12. – P. 16110–16123. DOI: 10.3390/ijerph121215046

21. A comparison of urban heat islands mapped using skin temperature, air temperature, and apparent temperature (Humidex), for the greater Vancouver area / H.C. Ho, A. Knudby, Y. Xu, M. Hodul, M. Aminipouri // Sci. Total Environ. – 2016. – Vol. 544. – P. 929–938. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.021

22. Delineation of Spatial Variability in the Temperature – Mortality Relationship on Extremely Hot Days in Greater Vancouver, Canada / H.C. Ho, A. Knudby, B.B. Walker, S.B. Henderson // Environ. Health Perspect. – 2017. – Vol. 125, № 1. – P. 66–75. DOI: 10.1289/EHP224

23. Зубец А.Н., Новиков А.В. Численная оценка стоимости жизни человека в России и в мире // Финансы: теория и практика / Finance: Theory and Practice. – 2018. – Т. 22, № 4. – С. 52–75. DOI: 10.26794/2587-5671-2018-22-4-52-75

24. Landsat TM and ETM+ thermal band calibration / J.A. Barsi, J.R. Schott, F.D. Palluconi, D.L. Helder, S.J. Hook, B.L. Markham, G. Chander, E.M. O'Donnell // Can. J. Remote Sensing. – 2003. – Vol. 29, № 2. – P. 141–153. DOI: 10.5589/m02-087

25. Dominguez-Delgado A., Domínguez-Torres H., Domínguez-Torres C.-A. Energy and Economic Life Cycle Assessment of Cool Roofs Applied to the Refurbishment of Social Housing in Southern Spain // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, № 14. – P. 5602. DOI: 10.3390/su12145602

Спутниковое картирование риска преждевременной смертности и экономических потерь, вызванных перегревом городской среды в российских мегалополисах / В.И. Горный, С.Г. Крицук, И.Ш. Латыпов, А.А. Тронин, Р.В. Бузинов, С.Н. Носков, Г.В. Еремин, Д.С. Борисова // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 2. – С. 46–59. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.04

UDC 614.2, 614.8, 612.014.43, 551.582.3
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.04.eng

Read online

Research article

ASSESSING ECONOMIC LOSSES FROM RISKS OF HEAT-RELATED PREMATURE MORTALITY USING SATELLITE MAPPING IN RUSSIAN MEGACITIES

V.I. Gornyy[1], S.G. Kritsuk[1], I.Sh. Latypov[1], A.A. Tronin[1], R.V. Buzinov[2], S.N. Noskov[2], G.B. Yeremin[2], D.S. Borisova[2]

[1]Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 39, 14th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russian Federation
[2]North-West Public Health Research Center, 4, 2nd Sovetskaya St., St. Petersburg, 191036, Russian Federation

This research aims to address the challenges associated with utilizing satellite imagery to create maps of economic losses due to premature deaths caused by urban heat stress in the Russian cities of Omsk and Rostov-on-Don.

The study intends to provide quantitative data that can be utilized for economic decision-making processes in the areas of environmental safety and public health. It suggests a theoretically substantiated satellite-based approach to map potential risks, mortality rates, and economic losses associated with heat-related fatalities. This approach has the potential to translate long-term satellite observations of urban temperatures into actionable recommendations for urban planning and health management strategies. The relevance of this research stems from the ongoing global concern regarding climate change and its negative impact on the health of urban residents.

Our research team has created digital maps of two significant cities, Omsk and Rostov-on-Don, each with similar populations but differing climatic conditions. These maps show the number of deaths associated with heat-related events as well as the associated economic losses. Their spatial resolution is 100 × 100 m, which allows analyzing a situation in a city as whole and within its municipal districts. Having compared the results obtained by satellite mapping with medical statistics per some Omsk districts, we have assessed the accuracy of our methodology to be approximately 20%. Our findings emphasize both the advisability to make strategic investments in mitigating risks of urban environment overheating in areas with a high potential for increased mortality from heat-related causes and the potential value of utilizing this information in urban planning initiatives aimed at adapting healthcare systems to global warming.

Keywords: *climate warming, urban heat islands, megacities, Omsk, Rostov-on-Don, overheating, risk, heat-related mortality, satellite, mapping, economic losses.*

References

1. Allen M.R., Dube O.P., Solecki W., Aragón–Durand F., Cramer W., Humphreys S., Kainuma M., Kala J. [et al.]. Global warming of 1.5 °C: Special Report. *IPCC*, 2018, 616 p.
2. Koppe C., Kovats S., Jendritzky G., Menne B. Heat-waves: risks and responses. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe, 2004, 123 p.
3. Shu C., Gaur A., Wang L., Lacasse M.A. Evolution of the local climate in Montreal and Ottawa before, during and after a heatwave and the effects on urban heat islands. *Sci. Total Environ.*, 2023, vol. 890, pp. 164497.

© Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Buzinov R.V., Noskov S.N., Yeremin G.B., Borisova D.S., 2025

Victor I. Gornyy – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Laboratory of Remote Methods of Geoecological Monitoring and Geoinformatics (e-mail: v.i.gornyy@mail.ru; tel.: +7 (812) 499-64-54; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9706-6919).

Sergey G. Kritsuk – Senior Researcher of the Laboratory of Remote Methods of Geoecological Monitoring and Geoinformatics (e-mail: sit.bloom@gmail.com; tel.: +7 (812) 499-64-54; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3781-322X).

Iskander Sh. Latypov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Remote Methods of Geoecological Monitoring and Geoinformatics (e-mail: liscander@mail.ru; tel.: +7 (812) 499-64-54; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8653-7308).

Andrei A. Tronin – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Director of the Scientific Research Center of Ecosafety of the Russian Academy of Sciences (e-mail: a.a.tronin@gmail.com; tel.: +7 (812) 499-64-54; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7852-8396).

Roman V. Buzinov – Doctor of Medical Sciences, director (e-mail: info@s-znc.ru; tel.: +7 (812) 655-62-26; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8624-6452).

Sergey N. Noskov – Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher (e-mail: info@s-znc.ru; tel.: +7 (812) 655-62-26; ORCID: http://orcid.org//0000-0001-7971-4062).

Gennadiy B. Yeremin – Candidate of Medical Sciences, Head of the Department of Hygiene, Leading Researcher (e-mail: info@s-znc.ru; tel.: +7 (812) 655-62-26; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1629-5435).

Daria S. Borisova – Junior Researcher (e-mail: info@s-znc.ru; tel.: +7 (812) 655-62-26; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0694-5334).

4. Ruuhela R., Jylha K., Lanki T., Tiittanen P., Matzarakis A. Biometeorological Assessment of Mortality Related to Extreme Temperatures in Helsinki Region, Finland 1972–2014. *Intern. J. Environ. Res. Public Health*, 2017, vol. 14, no. 8, pp. 944. DOI: 10.3390/ijerph14080944

5. Shartova N.V., Shaposhnikov D.A., Konstantinov P.I., Revich B.A. Air temperature and mortality: heat thresholds and population vulnerability study in Rostov-on-Don. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2019, no. 2, pp. 66–94. DOI: 10.21513/2410-8758-2019-2-66-94 (in Russian).

6. Vinogradova V.V., Zolotokrylin A.N. Current and Future Role of Climatic Factor in the Estimation of Natural Conditions of Life in Russia. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2014, no. 4, pp. 16–21. DOI: 10.15356/0373-2444-2014-4-16-21 (in Russian).

7. Andrade C. Understanding relative risk, odds ratio, and related terms: as simple as it can get. *J. Clin. Psychiatry*, 2015, vol. 76, no. 7, pp. e857-e861. DOI: 10.4088/JCP.15f10150

8. Guo Y., Gasparrini A., Li S., Sera F., Vicedo-Cabrera A.M., de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho M., Nascimento Saldiva P.H., Lavigne E. [et al.]. Quantifying excess deaths related to heatwaves under climate change scenarios: A multicountry time series modelling study. *PLoS Med.*, 2018, vol. 15, no. 7, pp. e1002629. DOI: 10.1371/journal.pmed.1002629

9. Hanzlíková H., Plavcová E., Kynčl J., Kříž B., Kyselý J. Contrasting patterns of hot spell effects on morbidity and mortality for cardiovascular diseases in the Czech Republic, 1994–2009. *Int. J. Biometeorol.*, 2015, vol. 59, no. 11, pp. 1673–1684. DOI: 10.1007/s00484-015-0974-1

10. Urban A., Davídkovova H., Kysely J. Heat- and cold-stress effects on cardiovascular mortality and morbidity among urban and rural populations in the Czech Republic. *Int. J. Biometeorol.*, 2014, vol. 58, no. 6, pp. 1057–1068. DOI: 10.1007/s00484-013-0693-4

11. Salam A., Kamran S., Bibi R., Korashy H.M., Parray A., Mannai A.A., Ansari A.A., Kanikicharla K.K. [et al.]. Meteorological Factors and Seasonal Stroke Rates: A Four-year Comprehensive Study. *J. Stroke Cerebrovasc. Dis.*, 2019, vol. 28, no. 8, pp. 2324–2331. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2019.05.032

12. Zhao Q., Guo Y., Ye T., Gasparrini A., Tong S., Overcenco A., Urban A., Schneider A. [et al.]. Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study. *Lancet Planet. Health*, 2021, vol. 5, no. 7, pp. e415–e425. DOI: 10.1016/S2542-5196(21)00081-4

13. Revich B.A., Grigorieva E.A. Health Risks to the Russian Population from Weather Extremes in the Beginning of the XXI Century. Part 1. Heat and Cold Waves. *Problemy analiza riska*, 2021, vol. 18, no. 2, pp. 12–33. DOI: 10.32686/1812-5220-2021-18-2-12-33 (in Russian).

14. Kritsuk S.G., Gornyy V.I., Latypov I.Sh., Pavlovskii A.A., Tronin A.A. Satellite Risk Mapping of Urban Surface Overheating (by the Example of Saint Petersburg). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 5, pp. 34–44. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-34-44 (in Russian).

15. Kritsuk S., Gornyy V., Davidan T., Latypov I., Manvelova A., Konstantinov P., Tronin A., Varentsov M., Vasiliev M. Satellite mapping of air temperature under polar night conditions. *Geo-spatial Information Science*, 2022, vol. 25, no. 2, pp. 325–336. DOI: 10.1080/10095020.2021.2003166

16. Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Manvelova A.B., Tronin A.A. Satellite Mapping of Urban Air Overheating Risk (Case Study of Helsinki, Finland). *Cosmic Res.*, 2022, no. 60, suppl. 1, pp. S38–S45. DOI: 10.1134/S0010952522700058

17. Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A. Satellite Mapping of Economic Damage from Urban Deaths Caused by Overheating (by Example of Helsinki, Finland). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 35–46. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-35-46 (in Russian).

18. Srivanit M., Hokao K. Thermal Infrared Remote Sensing for Urban Climate and Environmental Studies: An Application for the City of Bangkok, Thailand. *JARS*, 2012, vol. 9, no. 1, pp. 83–100. DOI: 10.56261/jars.v9i1.168598

19. Smargiassi A., Goldberg M.S., Plante C., Fournier M., Baudouin Y., Kosatsky T. Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands. *J. Epidemiol. Community Health*, 2009, vol. 63, no. 8, pp. 659–664. DOI: 10.1136/jech.2008.078147

20. Ho H.C., Knudby A., Huang W. Spatial Framework to Map Heat Health Risks at Multiple Scales. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2015, vol. 12, no. 12, pp. 16110–16123. DOI: 10.3390/ijerph121215046

21. Ho H.C., Knudby A., Xu Y., Hodul M., Aminipouri M. A comparison of urban heat islands mapped using skin temperature, air temperature, and apparent temperature (Humidex), for the greater Vancouver area. *Sci. Total Environ.*, 2016, vol. 544, pp. 929–938. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.021

22. Ho H.C., Knudby A., Walker B.B., Henderson S.B. Delineation of Spatial Variability in the Temperature-Mortality Relationship on Extremely Hot Days in Greater Vancouver, Canada. *Environ. Health Perspect.*, 2017, vol. 125, no. 1, pp. 66–75. DOI: 10.1289/EHP224

23. Zubets A.N., Novikov A.V. Quantitative assessment of the value of human life in Russia and in the world. *Finance: Theory and Practice*, 2018, vol. 22, no. 4, pp. 52–75. DOI: 10.26794/2587-5671-2018-22-4-52-75 (in Russian).

24. Barsi J.A., Schott J.R., Palluconi F.D., Helder D.L., Hook S.J., Markham B.L., Chander G., O'Donnell E.M. Landsat TM and ETM+ thermal band calibration. *Can. J. Remote Sensing*, 2003, vol. 29, no. 2, pp. 141–153. DOI: 10.5589/m02-087

25. Dominguez-Delgado A., Domínguez-Torres H., Domínguez-Torres C.-A. Energy and Economic Life Cycle Assessment of Cool Roofs Applied to the Refurbishment of Social Housing in Southern Spain. *Sustainability*, 2020, vol. 12, no. 14, pp. 5602. DOI: 10.3390/su12145602

Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Buzinov R.V., Noskov S.N., Yeremin G.B., Borisova D.S. Assessing economic losses from risks of heat-related premature mortality using satellite mapping in russian megacities. Health Risk Analysis, 2025, no. 2, pp. 46–59. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.04.eng

Получена: 23.05.2025
Одобрена: 09.06.2025
Принята к публикации: 26.06.2025

УДК 614+316.622
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.05

Читать онлайн

Научная статья

ФАКТОРЫ САМОСОХРАНИТЕЛЬНОГО И РИСКОГЕННОГО ПОВЕДЕНИЯ ТРУДОСПОСОБНОГО НАСЕЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО МЕГАПОЛИСА

С.С. Гордеева, С.Ю. Шарыпова, А.С. Шляпина

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Российская Федерация, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

Социально-экономическая устойчивость государства определяется здоровьем трудоспособного населения, формируемым поведением индивида, которое может быть направлено как на сохранение здоровья (самосохранительное), так и на его разрушение (рискогенное).

На основе анализа литературы были выделены три группы факторов, определяющие поведение индивида в сфере здоровья: социально-биологические, социально-экономические и социально-психологические. Данные факторы легли в основу разработки математической модели многофакторной обусловленности самосохранительного и рискогенного поведения населения трудоспособного возраста, проживающего в промышленном мегаполисе. Эмпирическую базу составили данные формализованного опроса, проведенного в 2025 г. среди жителей г. Перми (n = 582). Обработка и анализ данных осуществлялись с использованием программы SPSS Statistics. Для построения модели использовалась нейросетевая процедура многослойного перцептрона (Multilayer Perceptron, MLP).

В ходе исследования установлено, что поведение пермяков в отношении здоровья характеризуется умеренно-рискогенным профилем. Это проявляется в умеренном уровне приверженности к физической активности и медицинским практикам, а также в относительно низкой выраженности аддиктивных привычек. Выявленные в исследовании факторы находятся в сложной взаимосвязи. При этом наблюдается отсутствие однозначной связи между установками в отношении здоровья и фактическим осуществлением последовательного здоровьесберегающего поведения. Социальная поддержка функционирует как фактор, способствующий сохранению здоровья, но только при условии умеренной интенсивности; ее чрезмерная выраженность может нивелировать личную ответственность индивида. Кроме того, влияние социальных связей имеет двусторонний характер: они могут как поддерживать, так и способствовать формированию нездоровых моделей поведения через нормативное давление. Высокий уровень субъективного восприятия безопасности способствует повышению склонности к самосохранительному поведению, в то время как снижение этого восприятия инициирует противоположный процесс.

Исследование подчеркивает сложные механизмы взаимодействия факторов самосохранительного и рискогенного поведения, указывая на то, что практики не всегда проявляются в системной и устойчивой форме. Обоснована необходимость исследовательского поиска дополнительных компонентов, формирующих структуру самосохранительного поведения, помимо поведенческих практик. Профилактические подходы к снижению рискогенного поведения среди трудоспособного населения должны учитывать специфические факторы, обусловливающие это поведение в различных социальных группах, и адаптироваться к их конкретным потребностям.

Ключевые слова: *рискогенное поведение, самосохранительное поведение, здоровье, трудоспособное население, многофакторная обусловленность, нейросетевое моделирование.*

В условиях социально-экономической трансформации и неблагоприятных демографических тенденций здоровье трудоспособного населения выступает ключевым элементом человеческого капитала, от которого зависят воспроизводство социальной структуры, функционирование институтов и конкурентоспособность общества в целом. Повестка дня в области устойчивого развития государств до 2030 г.[1], разработанная при участии ВОЗ, направлена на снижение глобального бремени болезней и

© Гордеева С.С., Шарыпова С.Ю., Шляпина А.С., 2025

Гордеева Светлана Сергеевна – кандидат социологических наук, доцент кафедры социологии (e-mail: ssgordeyeva@mail.ru; тел.: 8 (342) 239-66-93; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5309-8318).

Шарыпова Софья Юрьевна – кандидат социологических наук, доцент кафедры социологии (e-mail: sonia.eliseeva@bk.ru; тел.: 8 (342) 239-66-93; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3519-8531).

Шляпина Анастасия Сергеевна – ассистент кафедры социологии, социолог центра социологических исследований (e-mail: shlyapina.psu@mail.ru; тел.: 8 (342) 239-66-93; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5398-2891).

[1] Повестка дня в области устойчивого развития [Электронный ресурс] // ООН: официальный сайт. – URL: https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/about/development-agenda/ (дата обращения: 29.04.2025).

достижение цели – сократить на одну треть вероятность преждевременной смерти среди людей, обладающих рабочим потенциалом, от заболеваний, которые преимущественно обусловлены поведенческими факторами риска [1]. Эти факторы не только оказывают негативное влияние на здоровье населения, в частности трудоспособного возраста, но и ставят под угрозу стабильность занятости, особенно в контексте стареющей рабочей силы [2]. Так, хронические заболевания во многих случаях приводят к невыходу на работу по болезни, снижению производительности труда и увеличению назначения пенсий по инвалидности, создавая существенное финансовое бремя для работодателей, федерального бюджета и национальной экономики [3]. Население промышленных мегаполисов дополнительно может подвергаться воздействию неблагоприятных санитарно-эпидемиологических факторов, включая несоответствие условий труда гигиеническим нормативам, а также влияние низкого качества питьевой воды и атмосферного воздуха [4]. В условиях негативного воздействия средовых факторов приверженность рискогенным поведенческим практикам усиливает тенденции ухудшения состояния здоровья трудоспособного населения. Таким образом, социальные и поведенческие аспекты сохранения здоровья трудоспособного населения промышленных регионов играют критически важную роль в формировании рынка труда, увеличении темпов роста ВВП и благосостояния всего общества.

В устойчивой связи с категорией «здоровье» находится самосохранительное поведение, которое выступает ее системообразующим элементом. Позитивно направленное самосохранительное поведение называют здоровьесберегающим или здоровьесохранным [5], а негативно направленное – рискогенным или саморазрушительным [6]. В научном дискурсе поведение в сфере здоровья трактуется с разных теоретических позиций, включая медицинский, психологический и социолого-демографический подходы [7, 8]. В социологии данная категория чаще раскрывается в русле поведенческого подхода через систему действий личности, направленных на сохранение или разрушение здоровья в течение всего жизненного цикла [9], а также выборов, которые делает индивид в отношении своего здоровья [10]. Она включает в себя различные поведенческие практики: питание, физическая и медицинская активность, аддиктивные практики и др. [11]. Самосохранительное поведение рассматривается не просто как индивидуальный феномен, оно встроено в более широкий социальный контекст и служит основополагающей нормой социального порядка в разных обществах, будучи «сформированной генетически и поддерживаемой социально» [12].

Поведение в сфере здоровья обусловлено множеством факторов, действующих на макро- и микроуровнях, имеющих как положительное, так и отрицательное воздействие. Макрофакторы представляют собой социально-политический, социально-экономический и социокультурный контекст. Например, в некоторых южноазиатских культурах курение может символизировать социальные связи и мужественность для мужчин, иллюстрируя, как социокультурные нормы могут нормализовать потенциально опасные для здоровья практики [13]. Микрофакторы самосохранительного поведения – это набор индивидуальных характеристик, обусловливающих поведение человека в сфере здоровья. Эти характеристики различаются в зависимости от исследований и охватывают: пол, возраст, образование, доход, социальное окружение [14], трудовую занятость, религиозную принадлежность, состояние здоровья [15], брачный статус, установки в сфере здоровья [16] и др. В настоящей работе фокус исследования направлен на микрофакторы, которые способствуют или препятствуют сохранению физического здоровья.

Модель убеждений о здоровье (Health Belief Model, HBM)[2] может служить теоретической основой для анализа влияния *половозрастных характеристик* на поведение в сфере здоровья. Например, исследователи доказывают, что принадлежность к женскому полу коррелирует с пониженным риском употребления психоактивных веществ, в частности табака, при этом отказ от употребления увеличивается с возрастом [17]. Однако если принимать во внимание другие практики самосохранительного поведения, например физическую активность, то исследования M. Helgesson et al. [18] показывают, что значительная часть людей старше 50 лет демонстрирует низкую приверженность этим практикам, по сравнению с более молодыми возрастными группами, по причине *состояния физического здоровья* и ограничений в мобильности.

Согласно так называемой «гипотезе защиты брака» (Marriage Protection Theory)[3], с*емейное положение* представляет собой значимый фактор самосохранительного поведения, так как женатые люди обладают более высоким уровнем здоровья благодаря взаимной социальной и финансовой поддержке партнеров, а также уходу за состоянием здоровья друг друга. Проживание с партнером, согласно ряду исследований, коррелирует с повышенной вероятностью отказа от табака, что может проявляться как в снижении частоты курения, так и в полном отказе от этой практики [19].

---

[2] Rosenstock I.M. The Health Belief Model and Preventive Health Behavior // Health Education Monographs. – 1974. – Vol. 2, № 4. – P. 354–386. DOI: 10.1177/109019817400200405

[3] Ross C.E., Mirowsky J., Goldsteen K. The Impact of the Family on Health: The Decade in Review // Journal of Marriage and the Family. – 1990. – Vol. 52, № 4. – P. 1059–1078. DOI: 10.2307/353319

Материальное благополучие как фактор поведения в отношении здоровья проявляет сложное воздействие: более высокий уровень дохода способствует доступу к спортивной инфраструктуре, разнообразным продуктам питания и медицинским услугам, в том числе профилактическим [20], а ограниченные финансовые возможности могут приводить к трудностям в оплате индивидуальных медицинских процедур и лекарственных средств [21]. В условиях ограниченных финансовых ресурсов забота о здоровье часто отходит на второй план, становясь приоритетом лишь в случае возникновения серьезных проблем со здоровьем.

Согласно теории человеческого капитала (Human Capital Theory)[4], *образование* улучшает знания, навыки и другие умственные способности, которые могут быть применены для улучшения здоровья. Образованные люди, как правило, лучше понимают важность здоровьесохранных практик, что может привести к более активному участию в профилактических мероприятиях и улучшению общего состояния здоровья [22]. Как отмечают американские исследователи, более высокий уровень грамотности в вопросах здоровья позволяет людям пересмотреть «традиционный» образ жизни, характеризующийся неправильным питанием и сниженной физической активностью [23].

Анализ организации трудовой деятельности и ее особенностей предоставляет теоретико-методологическую рамку для понимания взаимосвязей между профессиональной средой и поведением в отношении здоровья. *Профессиональная деятельность*, с одной стороны, дает больше возможностей определенным группам трудоспособного населения в реализации самосохранительного поведения, например, некоторые работодатели предоставляют доступ к медицинским услугам. Также оптимизация питания рабочих промышленных предприятий является высокоэффективным средством профилактики профессиональных заболеваний и улучшения здоровья и работоспособности [24]. С другой стороны, продолжительные и интенсивные рабочие часы могут привести к повышению уровня стресса, что негативно сказывается на общем состоянии здоровья человека [25]. При этом работники, занимающиеся интенсивным физическим трудом, по оценкам исследователей [26], имеют более высокий риск формирования нездоровых практик по сравнению с представителями других профессиональных категорий.

Важным фактором самосохранительного поведения выступает *установка на сохранение здоровья*, которая включает в себя как оценку текущего состояния здоровья, так и намерение его улучшить, выступая в качестве непосредственного детерминанта поведенческих намерений, направленных на поддержание и укрепление здоровья [27]. По оценкам исследователей [28], люди, демонстрирующие высокую степень заботы о собственном здоровье, обычно придерживаются более здоровых пищевых практик и реже склонны к нездоровым моделям питания.

Социальная поддержка, оказываемая близким окружением, обусловливает приверженность к здоровьесбережению. Например, при лечении диабета высокий уровень семейной поддержки способствует более эффективному соблюдению режима самопомощи [29]. Кроме этого, эмоциональная поддержка друзей коррелирует с поддержанием рекомендуемых уровней физической активности в свободное время [30]. Также условия взаимодействия на рабочих местах могут создавать уникальные контексты, формирующие как индивидуальные, так и коллективные решения в отношении здоровьесохранных практик. Исследования подтверждают [31], что социальные и организационные факторы, такие как восприятие ценности здоровья работников со стороны компании и наличие коллег, ориентированных на здоровьесохранные практики, значительно коррелируют с правильным питанием, повышенным уровнем физической активности и снижением риска избыточной массы тела.

Стоит учитывать, что поведение индивидов в сфере здоровья также формируется под воздействием их восприятия серьезности угроз для здоровья, а также от оценки потенциальных преимуществ и барьеров, связанных с принятием здоровьесберегающих мер[5] [18]. *Субъективное восприятие безопасности* представляет собой индивидуальный процесс, посредством которого люди идентифицируют риски и принимают решения в отношении них. Исследования показывают [32], что использование ремней безопасности на переднем сиденье для сохранения здоровья, как правило, ниже в черте города, по сравнению с вождением по шоссе, вероятно, из-за более низкого восприятия риска в городских условиях.

По итогу обзора научной литературы факторы поведения, направленного на сохранение или разрушение здоровья, были систематизированы следующим образом для эмпирической проверки: а) социально-биологические (пол, возраст); б) социально-экономические (семейное положение, наличие детей, уровень образования, статус занятости, уровень дохода); в) социально-психологические (установка в сфере здоровья, социальная поддержка, субъективное восприятие безопасности).

Цель исследования – разработка математической модели многофакторной обусловленности са-

[4] Becker G.S. Human capital: a theoretical and empirical analysis, with special reference to education. – Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research, 1964.

[5] Rosenstock I.M. The Health Belief Model and Preventive Health Behavior // Health Education Monographs. – 1974. – Vol. 2, № 4. – P. 354–386. DOI: 10.1177/109019817400200405

мосохранительного и рискогенного поведения населения трудоспособного возраста, проживающего в промышленном мегаполисе.

Материалы и методы. В настоящей работе эмпирической базой выступают данные формализованного опроса, проведенного в марте 2025 г., на выборке жителей Перми[6]. Данный город является одним из ключевых промышленных мегаполисов России, где функционируют такие крупные предприятия. как ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез», АО «Камтэкс-Химпром», АО «ОДК-Пермские моторы» и др.

Из общей выборочной совокупности для последующего анализа были отобраны граждане трудоспособного возраста: мужчины – 18–62 года и женщины – 18–57 лет. Для определения возрастных границ трудоспособности использовался подход Федеральной службы государственной статистики по Пермскому краю[7]. При этом в Перми, как и в РФ, официально трудоспособный возраст начинается от 16 лет. Смещение нижней границы до 18 лет связано с тем, что лица младшего возраста не участвовали в опросе.

Выбор населения трудоспособного возраста в качестве объекта исследования обусловлен его ключевой ролью в обеспечении экономической и социальной стабильности государства, также его численным превосходством, которое позволяет через социальные взаимодействия распространять модели поведения этой группы на другие, в том числе в отношении здоровья. По данным Пермьстата, на 1 января 2024 г. численность пермяков трудоспособного возраста составляет 1412,8 тысячи человек (для сравнения: моложе этого возраста – 499,5, старше – 583,0).

Объем анализируемой подвыборки составил 582 человек. Для дальнейших расчетов была произведена коррекция выборки по полу для соответствия гендерной структуре трудоспособного городского населения Перми: мужчины – 49,8 %, женщины – 50,2 %. По преобладающим характеристикам выборки: среди опрошенных 53 % состоят в браке или сожительствуют, 59 % заявляют об отсутствии детей, 56 % имеют высшее образование и 66 % работают по найму.

Поведенческая концепция [33] предлагает наиболее распространенный подход для определения самосохранительного поведения (его позитивной и негативной направленности), которое эмпирически интерпретируется как совокупность поведенческих практик, направленных на сохранение или разрушение физического здоровья, и операционализируется через такие компоненты, как: а) физическая активность («*Как часто Вы занимаетесь физическими упражнениями или спортом?»)*; б) питание («*Можете ли Вы назвать свое питание «здоровым»?»)*; в) аддиктивные практики (курение – «*Курите ли Вы в настоящее время хотя бы иногда сигареты, электронные сигареты, системы нагревания табака, вейп, кальяны и др.?»;* употребление алкогольных напитков («*Употребляете ли Вы алкогольные напитки? Если да, то как часто?»)*; г) медицинская активность *(«Как часто Вы проходите медицинские осмотры или диспансеризацию?»)*. На основе согласованности этих переменных (подтверждено коэффициентом Альфа Кронбаха) и с учетом их преобразования был создан совокупный индекс *S*, характеризующий индивидуальный уровень самосохранительного поведения. Каждому из значений компонентов были присвоены соответствующие баллы, сумма которых (в диапазоне от 5 до 25 баллов) позволяет определить индивидуальный уровень у респондента: более высокие баллы указывают на проявление здоровьесберегающих практик, а низкие – на преобладание рискогенных. В ходе работы с переменными для упрощения восприятия данные индекса *S* были переведены в процентные обозначения выраженности тех или иных поведенческих практик у респондентов от 0 до 100 %.

Для измерения выделенных в результате литературного обзора факторов самосохранительного поведения были использованы следующие вопросы. Социально-биологические факторы: *«Ваш пол?», «Сколько Вам полных лет?»*. Социально-экономические факторы: *«Ваше семейное положение?», «Есть ли у Вас дети в возрасте до 18 лет?», «Какое у Вас образование?», «Какое ваше основное занятие в настоящее время?», «Скажите, какая характеристика в большей степени соответствует вашему финансовому положению?»*. Дополнительно в анализе задействованы другие вопросы о наличии финансовых ресурсов для поддержания здоровья: *«Есть ли у Вас финансовая возможность обратиться за платной медицинской помощью в случае необходимости?»*. Для изучения социально-психологических факторов были выбраны вопросы: *«Как бы Вы описали собственное отношение к своему здоровью?», «Насколько Вы чувствуете поддержку (эмоциональную, финансовую или информационную) со стороны своей семьи и друзей в вопросах здоровья и безопасности?»* и *«Можно ли сказать, что Вы себя чувствуете в полной безопасности?»*.

Обработка и анализ данных осуществлялись в программе SPSS Statistics. С целью описания уровня самосохранительного поведения и его связи с выделенными факторами применялись методы дескриптивной статистики и корреляционного и регрессионного анализов. Для построения математической модели, отражающей многофакторную обусловленность самосохранительного поведения, использовалась нейросетевая процедура многослойного пер-

---

[6] Авторское исследование.

[7] Статистический ежегодник Пермского края. 2024: статистический сборник. – Пермь: Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Пермскому краю (Пермьстат), 2024. – 337 с.

цептрона (Multilayer Perceptron, MLP). В ходе этой процедуры скрытые нейроны формируются на основе линейной комбинации категориальных входов, автоматически преобразуемых в фиктивные переменные (dummy coding). Для переменных, имеющих вид абсолютной шкалы, например возраст, производилась нормализация признаков.

Результаты и их обсуждение. Изучение отдельных поведенческих практик в сфере здоровья у пермяков трудоспособного возраста (далее – пермяки, жители Перми) указывает на преобладание позитивных тенденций. Половина опрошенных каждый день (12 %) или несколько раз в неделю (38 %) занимаются спортом. Также 43 % ежегодно проходят медицинские осмотры и диспансеризацию. Не посещают медицинские организации даже в ситуации, когда что-то беспокоит, не более 6 %. При оценке своего питания основная доля пермяков (48 %) выбирают среднее значение – 3, но с перевесом в положительную сторону, т.е. 31 % выбирают значение 4 по шкале от 1 до 5, где 1 – совершенно не здоровое, 5 – полностью здоровое. Кроме этого, у жителей Перми наблюдается небольшая выраженность аддиктивных практик: курят менее половины опрошенных (42 %), а средняя частота употребления алкоголя – это раз в месяц и реже, при этом вообще не пьют алкогольные напитки 16 %.

Среднее значение индекса *S*, который характеризует индивидуальный уровень выраженности самосохранительного поведения на основе совокупности указанных выше компонентов, равняется 67 % из 100 %, что характеризует умеренно-рискогенный уровень поведения пермяков трудоспособного возраста. На основании этого индекса опрошенные были разделены на группы, часть из которых в большой степени имеют здоровьесохранную ориентацию, а часть – рискогенную (табл. 1).

Следующей задачей исследования была эмпирическая проверка теоретической факторной структуры и ее жизнеспособности относительно самосохранительного поведения. Выделенные социально-биологические факторы подтвердили свое влияние на уровень самосохранительного поведения на выборке жителей Перми, причем гендерная принадлежность имеет более сильное влияние (*r*-Пирсона = 0,256 при $p < 0,001$), нежели возрастная (*r*-Пирсона = 0,082 при $p < 0,05$). Среди социально-экономических факторов значимым предиктором оказался лишь уровень образования (ρ-Спирмена = 0,173 при $p < 0,001$). Уровень дохода не показал ожидаемого статистически значимого влияния, поэтому для корреляции использовался показатель о наличии финансовых возможностей для поддержания здоровья (*r*-Пирсона = -0,139 при $p < 0,001$). Все социально-психологические факторы также подтвердили значимость в формировании самосохранительного поведения: социальная поддержка (*r*-Пирсона = 0,139 при $p < 0,001$) и субъективное восприятие безопасности (*r*-Пирсона = 0,105 при $p < 0,001$). Особенно сильным предиктором во всей факторной структуре оказалась установка на сохранение здоровья (ρ-Спирмена = -0,405 при $p < 0,001$). Статус зависимых и независимых переменных в паре «фактор – самосохранительное поведение» подтвержден с помощью коэффициента *D* Сомерса при $p < 0,001$. Также была выявлена значимая связь между социально-психологическими и социально-экономическими факторами (ρ-Спирмена > 0,2 при $p < 0,001$).

Корреляционный анализ выступил в качестве предварительного этапа отбора предикторов при нейросетевом моделировании с целью исключения переменных, не обладающих значимой линейной связью с зависимой переменной. Несмотря на нелинейную природу моделей, построенных с помощью многослойного перцептрона, предварительная фильтрация

Таблица 1

Характеристика групп с разным уровнем самосохранительного поведения

Параметр	Критически рискогенный	Рискогенный	Умеренно-рискогенный	Здоровье-сохранный	Максимально здоровьесохранный
Частота физической активности*	Группа пустая, нет данных о средних значениях	4 (реже, чем раз в неделю)	3 (раз в неделю)	2 (несколько раз в неделю)	2 (несколько раз в неделю), при этом каждый день – 35 %
Оценка питания как здорового[8]		2,7	3,2	3,4	4,4
Курение		Курят 96 %	Курят 62 %	Курят 5 %	Не курят 100 %
Потребление алкоголя*		2 (раз в неделю)	4 (несколько раз в месяц)	6 (реже одного раза в месяц)	7 (не употребляю)
Частота медицинских осмотров*		4 (когда что-то беспокоит)	2 (раз в 2–3 года)	1 (каждый год)	1 (каждый год)
Показатель индекса *S*, %	0–10	11–50	51–70	71–90	91–100
Доля опрошенных, %	0	14	38	43	5

Примечание: * – использовались медианные значения характеристик.

[8] Респонденты оценивали свое питание как «здоровое» по шкале от 1 до 5, где 1 – совершенно не здоровое, 5 – полностью здоровое (в таблице указано среднее арифметическое значение).

по корреляционным признакам позволяет улучшить интерпретируемость модели, снизить риск переобучения и упростить дальнейшее обучение сети. Для минимизации ограничений в мультиколлинеарности дополнительно был реализован регрессионный анализ, который подтвердил ее отсутствие и позволил оценить значимость предикторов.

На основании индекса *S* была сформирована зависимая переменная – категория принадлежности к одной из двух групп: 1) группа, проявляющая в большей степени рискогенные практики в отношении здоровья, которая объединила рискогенный и умеренно-рискогенный уровни (см. табл. 1); 2) группа со здоровьесохранными практиками в отношении здоровья (в табл. 1 это здоровьесохранный и максимально здоровьесохранный уровни). Условно группы обозначены как «рискогенная» и «самосохранительная». При оценке объяснительной способности модели производилось аппаратное разделение данных на обучающую (70 % от валидных данных[9]) и тестовую (30 % от валидных данных) выборки.

Нейросетевая модель включила в себя шесть скрытых нейронов, каждый из которых активировался на основе линейной комбинации предикторов с соответствующими весами и смещением. Веса отражают вклад предиктора в активацию нейрона. В интерпретации описываются наиболее значимые переменные по весу, однако стоит отметить, что влияние предикторов на выход модели нелинейно и зависит от активаций других нейронов и их весов на последующих слоях (табл. 2).

Активация *первого нейрона (H1:1)* преимущественно определяется уровнем образования (Q8): максимальный вклад вносят «среднее профессиональное образование (СПО)» (0,362) и «незаконченное высшее (НВО)» (0,312). Подавляют активацию такие переменные, как мужской пол (Q3 = 1; -0,335), возраст (Q4; -0,483) и отсутствие финансовой

Таблица 2

Оценки параметров нейросетевой модели

Предиктор		Предсказанные							
		Скрытый слой 1						Выходной слой	
Входной слой		H (1:1)	H (1:2)	H (1:3)	H (1:4)	H (1:5)	H (1:6)	[O12 = 1]	[O12 = 2]
	Смещение	0,229	0,408	-0,359	0,422	-0,185	-0,131		
Пол	[Q3 = 1]	-0,335	-0,024	-0,240	-0,342	0,637	0,601		
	[Q3 = 2]	-0,066	-0,316	0,088	-0,132	-0,081	-0,407		
Образование	[Q8 = 1]	0,296	-0,188	-0,541	0,413	-0,087	0,105		
	[Q8 = 2]	0,362	-0,077	0,419	0,264	0,205	0,388		
	[Q8 = 3]	0,312	0,218	-0,281	0,339	-0,058	-0,069		
	[Q8 = 4]	0,236	-0,163	0,250	0,175	0,252	-0,103		
Установка на сохранение здоровья	[Q13 = 1]	-0,126	0,299	0,156	0,411	-0,344	-0,470		
	[Q13 = 2]	-0,049	-0,444	0,426	-0,406	-0,353	0,308		
	[Q13 = 3]	0,134	0,520	-0,353	-0,415	0,311	0,352		
	[Q13 = 4]	-0,307	0,505	-0,512	0,034	0,395	0,515		
	[Q13 = 5]	0,219	0,463	0,313	-0,126	0,275	-0,166		
Ощущение безопасности	[Q51 = 1]	0,083	-0,345	-0,189	-0,112	-0,042	0,301		
	[Q51 = 2]	-0,276	0,111	0,304	-0,011	-0,080	-0,053		
	[Q51 = 3]	-0,212	0,085	0,106	-0,195	0,329	-0,290		
	[Q51 = 4]	-0,142	0,187	-0,265	-0,349	-0,617	-0,033		
	[Q51 = 5]	0,413	0,454	-0,021	0,104	-0,203	-0,049		
Социальная поддержка	[Q54 = 1]	0,223	0,465	0,337	0,241	-0,171	-0,372		
	[Q54 = 2]	0,008	-0,075	-0,322	0,499	-0,163	0,511		
	[Q54 = 3]	-0,005	-0,459	-0,177	-0,205	-0,099	0,199		
	[Q54 = 4]	0,308	0,249	0,179	-0,040	-0,208	-0,547		
	[Q54 = 5]	-0,462	0,174	0,248	-0,452	-0,452	-0,446		
Финансовые возможности	[Q59 = 1]	-0,200	0,272	0,447	-0,412	-0,556	0,089		
	[Q59 = 2]	-0,468	0,193	0,203	-0,371	0,167	-0,143		
Возраст	Q4	-0,483	0,148	0,189	0,036	-0,707	-0,110		
Скрытый слой	Смещение							0,382	-0,086
	H (1:1)							-0,407	-0,340
	H (1:2)							0,418	-0,173
	H (1:3)							-0,359	0,383
	H (1:4)							0,201	-0,138
	H (1:5)							0,743	-0,357
	H (1:6)							0,364	0,050

[9] Из расчета многослойного перцептрона были исключены 90 наблюдений, поэтому валидными данными выступает не весь объем выборочной совокупности, а 85 % опрошенных (493 человека).

возможности оплачивать медицинские услуги (Q59 = 2; -0,468). Социально-психологические факторы показывают противоречивое влияние, отражая нелинейность модели: полное ощущение безопасности (Q51 = 5; 0,413) и умеренная социальная поддержка (Q54 = 4; 0,308) усиливают активацию, при этом абсолютная поддержка со стороны близких (Q54 = 5; -0,462) снижает ее. Также снижает отсутствие установки заботиться о своем здоровье (Q13 = 4; -0,307). В результате сочетание указанных выше предикторов с учетом других скрытых слоев снижает вклад первого нейрона в классификацию респондентов: уменьшается вероятность отнесения к «рискогенной» группе (-0,407) и «самосохранительной» (-0,340).

Активация *второго нейрона (H1: 2)* усиливается негативными социальными установками в отношении здоровья (Q13 = 3, 4, 5), полным ощущением безопасности (Q51 = 5; 0,454) и отсутствием социальной поддержки (Q54 = 1; 0,465). Противоположный эффект оказывают: установка на сохранение здоровья (Q13 = 2; -0,444), отсутствие ощущения безопасности (Q51 = 1; -0,345), умеренная поддержка со стороны близких (Q54 = 3; -0,459) и женский пол (Q3 = 2; -0,316). Анализ выходного слоя показывает, что данный нейрон увеличивает вероятность отнесения к «рискогенной» группе (0,418), но снижает активацию для «самосохранительной» группы (-0,173).

Третий нейрон (H1: 3) характеризуется полярным распределением весовых коэффициентов для взаимоисключающих переменных. В частности, усиливают активацию третьего нейрона законченное среднее (Q8 = 2; 0,419) [10] или высшее (Q8 = 4; 0,250) образование, а снижают среднее общее (Q8 = 1; -0,542) и незаконченное высшее (Q8 = 3; -0,281) образование. Схожая картина наблюдается в отношении установки в сфере здоровья: здесь существенным вкладом в активацию обладает выраженная установка заботиться о здоровье (Q13 = 2; 0,426), а снижение происходит из-за таких признаков, как реактивное отношение к здоровью, т.е. обращение внимания при наличии проблем (Q13 = 3; -0,353), и отсутствие заботы о здоровье (Q13 = 4; -0,512). Кроме этого, значительное влияние на активацию нейрона оказывает наличие финансовых возможностей (Q59 = 1; 0,447), отсутствие ощущения безопасности (Q51 = 2; 0,304) и полное отсутствие социальной поддержки (Q54 = 1; 0,337). Нейрон оказывает двойное влияние на выходной слой: повышает вероятность отнесения к «самосохранительной» группе (0,383) и снижает – к «рискогенной» (-0,359).

Четвертый нейрон (H1: 4) активируется при ответственном отношении к здоровью (Q13 = 1; 0,411), наличии общего среднего (Q8 = 1; 0,413) или неполного высшего (Q8 = 3; 0,339) образования, также при низком уровне поддержки со стороны близких (Q54 = 2; 0,499). При этом подавляют данный нейрон: мужской пол (Q3 = 1; -0,342), внимательное (Q13 = 2; -0,406) или реактивное (Q13 = 3; -0,415) отношение к здоровью, повышенное чувство безопасности (Q51 = 4; -0,349) и отсутствие социальной поддержки (Q54 = 5; -0,452). Выходные веса этого нейрона, в сравнении с другими, слабо влияют на итоговую классификацию: для «рискогенной» группы – 0,201, для самосохранительной – -0,138.

Активация *пятого нейрона (H1: 5)* усиливается за счет мужского пола (Q3 = 1; 0,637), негативных установок относительно здоровья (Q13 = 3; 0,311, Q13 = 4; 0,395, Q13 = 5; 0,275), высшего образования (Q8 = 4; 0,252) и среднего уровня восприятия безопасности (Q51 = 3; 0,329). Снижают активность нейрона внимательное (Q13 = 2; -0,353) и ответственное (Q13 = 1; -0,344) отношение к здоровью, повышенное чувство безопасности (Q51 = 4; -0,617), наличие социальной поддержки (Q54 = 5; -0,452); возраст (Q4; -0,707) и наличие финансовых возможностей (Q59 = 1; -0,556). Данный нейрон повышает вероятность отнесения к «рискогенной» группе (0,743) и снижает по отношению к «самосохранительной» (-0,357).

Шестой нейрон (H1: 6) демонстрирует повышенную активацию для мужчин (Q3 = 1; 0,601) и сниженную – для женщин (Q3 = 2; -0,407). Среди различных установок относительно своего здоровья наибольшим весом обладают установки на безразличное (Q13 = 3; 0,515), реактивное (Q13 = 2; 0,352) и внимательное (Q13 = 1; 0,308) отношения к здоровью. Также повышенная активность нейрона связана с низким уровнем ощущения безопасности (Q51 = 1; 0,301) и умеренной социальной поддержкой (Q54 = 2; 0,511). Снижение активации нейрона, помимо женского пола, наблюдается при наличии следующих признаков: ответственного отношения к здоровью (Q13 = 1; -0,470), среднего уровня восприятия безопасности (Q51 = 3; -0,290) и повышенного уровня социальной поддержки (Q54 = 5; -0,446, Q54 = 4; -0,547). Шестой нейрон вносит положительный вклад в прогнозирование «рискогенной» группы (0,364) и минимальный вклад для «самосохранительной» группы (0,050).

В результате анализа математическую модель многофакторной обусловленности самосохранительного поведения населения трудоспособного возраста, проживающего в промышленном мегаполисе (на примере жителей г. Перми), можно представить в виде уравнения для входных сигналов выходных нейронов, соответствующих группам:

- «рискогенная»: $O1 = F$ (0,382 – 0,407 · H1:1 + 0,418 · H1:2 – 0,359 · H1:3 + 0,201 · H1:4 + 0,743 · H1:5 + 0,364 · H1:6);

[10] Примечательно, что усиливается из-за неспособности респондентов определить свое отношение к здоровью (Q13 = 5; 0,313). Вероятно, это связано с ограниченной выборкой.

• «самосохранительная»: $O2 = F$ (-0,086 – 0,340 · H1:1 – 0,173 · H1:2 + 0,383 · H1:3 – 0,138 · H1:4 – 0,357 · H1:5 + 0,050 · H1:6).

Тип функции F в данной модели – это сигмоидальная (логистическая) функция, которая используется для преобразования комбинации всех сигналов и весовых коэффициентов в выходное значение, определяющее вероятность принадлежности к группе.

Проведенный анализ с использованием многослойного перцептрона позволил выявить комплекс взаимосвязанных факторов, определяющих склонность индивидов к самосохранительному или рискогенному поведению. На основе показателя важности признаков было выявлено, что социальные установки касательно здоровья обладают наибольшей важностью в рамках полученной модели (99 %), далее по значимости идут пол (61,6 %), социальная поддержка (56 %), финансовые возможности (37,2 %), образование (28,2 %), ощущение безопасности (27,8 %) и возраст (27 %).

Модель продемонстрировала способность к классификации исходных признаков с точностью до 70 %, причем ее способность прогнозирования для группы со здоровьесохранными практиками составила 83 %, а для группы с рискогенными практиками – 45 %.

Согласно результатам исследования, поведение пермяков трудоспособного возраста в отношении здоровья можно охарактеризовать как умеренно-рискогенное. Это согласуется с данными других исследований, в частности, на выборке работников промышленных предприятий Пермского края [6], где было установлено, что практики поведения в сфере здоровья у основной доли опрошенных (53 %) имеют средний уровень рискогенности.

В рамках анализа самосохранительного поведения было определено наибольшее влияние таких факторов, как установка на сохранение здоровья, гендерная принадлежность, социальная поддержка и финансовые возможности для получения платных медицинских услуг. Эти выводы находят отражение в общественном сознании. Так, в исследовании 2023 г. [34] медицинские работники г. Москвы в качестве основных детерминант приверженности к самосохранительному поведению отметили ответственность за здоровье (22 %) и доступность медицинских услуг, в том числе платных (20 %). При этом, по мнению опрошенных, снижает мотивацию к ведению здорового образа жизни отсутствие поддержки со стороны окружающих.

Архитектура из шести скрытых нейронов выявила нелинейные взаимодействия социально-биологических, социально-экономических и социально-психологических переменных, формирующих латентные профили поведения. Вместе с тем социально-психологические факторы проявили дуалистический эффект. Во-первых, несмотря на высокую значимость установки в отношении здоровья как фактора самосохранительного поведения, стоит учитывать, что выраженность этого фактора не всегда коррелирует с реализацией последовательного здоровьесберегающего поведения. A. Brügger et al. установили, что респонденты с высокой степенью заботы о здоровье проявляют меньшую склонность к поиску информации о здоровье после внедрения здоровьесберегающих практик [35]. Это объясняется тем, что предыдущие здоровьесберегающие действия могут служить оправданием для последующего сокращения активности, направленной на укрепление здоровья.

Во-вторых, поддержка близких выступает здоровьесохранным фактором только при умеренной интенсивности, максимальная выраженность может нивелировать личную ответственность. Кроме этого, социальные связи индивида могут не только оказывать поддержку, но и посредством нормативного влияния способствовать нездоровому поведению. Например, для мужчин курение – это способ поддерживать отношения с окружающими (друзьями, коллегами) [13].

В-третьих, субъективное восприятие безопасности на высоком уровне повышает склонность к самосохранительному поведению, но снижение уровня восприятия запускает обратный процесс. Исследователи объясняют такую закономерность тем, что внешние угрозы могут восприниматься индивидом как неконтролируемые по отношению к его здоровью, поэтому индивид ничего не предпринимает в отношении существующих факторов риска здоровью, т.е. его поведение по сохранению здоровья остается пассивным [36].

Обозначенные в исследовании факторы взаимосвязаны. Например, социальная поддержка коррелирует с финансовыми возможностями в отношении поддержания здоровья. Это объясняется тем, что социальная поддержка, оказываемая близким окружением, представляет собой многомерную конструкцию, включающую несколько типов, один из которых – это инструментальная поддержка, в частности, предоставление финансовых ресурсов [37].

Несмотря на то, что материальное благополучие и уровень образования представляют собой отдельные переменные, они, как правило, взаимосвязаны при влиянии на самосохранительное поведение [38]. Так, роль образования в детерминации этого поведения возрастает, особенно в условиях ограниченных финансовых ресурсов, поскольку многие здоровьесберегающие практики предполагают минимальные или нулевые денежные затраты [39].

Выводы. Здоровье и проблемы самосохранительного поведения человека имеют особое значение, влияя на характер социального взаимодействия личности, расстановку ее индивидуальных приоритетов, и занимают важное место в иерархии социальных ценностей и норм [40]. Важность исследования поведения в сфере здоровья становится все более очевидной в современных промышленных мегаполисах, где разнообразные стрессовые ситуа-

ции и изменения в городском пространстве создают дополнительные психоэмоциональные нагрузки, требующие адаптивных реакций со стороны организма человека и социальных институтов общества. Хотя городские условия предлагают такие преимущества, как близость к рабочим местам, возможности получения образования и доступ к развитой социальной инфраструктуре, отечественные исследования [41] показывают, что другие условия промышленной среды существенно увеличивают риски здоровью [42]. В связи с этим анализ факторов самосохранительного и рискогенного поведения трудоспособного населения промышленных мегаполисов является актуальным для разработки эффективных стратегий в сфере решения социально-экономических проблем и, в частности, улучшения качества жизни и здоровья граждан. Представленная модель многофакторной обусловленности самосохранительного поведения подчеркивает важность баланса внешней поддержки и внутренней автономии в формировании этого поведения и способствует оптимизации профилактических и здоровьесберегающих программ для различных социально-демографических групп.

Исследование иллюстрирует сложные механизмы связи факторов и самосохранительного поведения, подчеркивая, что поведенческие практики, ориентированные на сохранение здоровья, не всегда характеризуют системное и устойчивое поведение в этой области. Поиск дополнительных компонентов, составляющих структуру самосохранительного поведения, помимо поведенческих практик, формирует основу для последующих исследований.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-18-00480 «Самосохранительные стратегии россиян в условиях новой нормальности».

Конфликт интересов. Авторы статьи сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Staykova A.P., Titopoulou M. Study on the Behavioral Health Risk Factors of Sewing Industry Workers in Bulgaria // European Journal of Economics and Business Studies. – 2017. – Vol. 3, № 2. – P. 200–211. DOI: 10.26417/ejes.v8i1.p200-211

2. Park J., Kim Y. From Workers to the Working-Age Population: A New Paradigm for the Occupational Health Service // Saf. Health Work. – 2019. – Vol. 10, № 3. – P. 251 –253. DOI: 10.1016/j.shaw.2019.07.002

3. Васильева Т.П., Ларионов А.В. Концептуальный подход к управлению поведенческой детерминантой общественного здоровья // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. – 2025. – Т. 33, № 1. – С. 7–17. DOI: 10.35627/2219-5238/202533-1-7-17

4. Ожидаемая продолжительность жизни в субъектах Российской Федерации с различным уровнем санитарно-эпидемиологического благополучия и образа жизни населения. Резервы управления / С.В. Клейн, Г.Г. Онищенко, Н.В. Зайцева, М.В. Глухих // Анализ риска здоровью. – 2022. – № 4. – С. 18–32. DOI: 10.21668/health.risk/2022.4.02

5. Зубок Ю.А., Проказина Н.В. Отношение молодежи к новой коронавирусной инфекции: динамика представлений и практики здоровьесберегающего поведения // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. – 2021. – Т. 29, № S1. – С. 752–757. DOI: 10.32687/0869-866X-2021-29-s1-752-757

6. Рязанова Е.А. К проблеме типологии рискогенного поведения (анализ на примере промышленного предприятия Пермского края) // Анализ риска здоровью. – 2016. – № 2. – С. 68–75. DOI: 10.21668/health.risk/2016.2.08

7. Кислицына О.А. Социальные различия в состоянии здоровья россиян: роль материальных, психосоциальных и поведенческих факторов // Социальные аспекты здоровья населения [сетевое издание]. – 2023. – Т. 69, № 3. – С. 7. DOI: 10.21045/2071-5021-2023-69-3-7

8. Короленко А.В. Модели самосохранительного поведения населения: подходы к изучению и опыт построения // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 248–263. DOI: 10.15838/esc.2018.3.57.16

9. Ковалева А.А. Самосохранительное поведение в системе факторов, оказывающих влияние на состояние здоровья // Журнал социологии и социальной антропологии. – 2008. – Т. XI, № 2. – С. 179–191.

10. Назарова И.Б. Мониторинг состояния здоровья населения и факторов риска для здоровья (к методологии изучения здоровья) // Вестник РУДН. Серия: Социология. – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 616–629. DOI: 10.22363/2313-2272-2022-22-3-616-629

11. Ростовская Т.К., Иванова А.Е., Князькова Е.А. Практики самосохранительного поведения россиян (результаты всероссийского социологического исследования «Демографическое самочувствие России») // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. – 2021. – Т. 29, № 1. – С. 66–75. DOI: 10.32687/0869-866X-2021-29-1-66-75

12. Яницкий О.Н. Принципы и следствия современной войны: взгляд социолога: монография [Электронный ресурс] // Официальный сайт ИС РАН. – 2015. – 172 с. URL: http://www.isras.ru/publ.html?id=3298 (дата обращения: 29.04.2025).

13. Understanding influences on smoking in Bangladeshi and Pakistani adults: community based, qualitative study / J. Bush, M. White, J. Kai, J. Rankin, R. Bhopa // BMJ. – 2003. – Vol. 326, № 7396. – P. 962. DOI: 10.1136/bmj.326.7396.962

14. Барахоева Р.Б. Факторы, влияющие на уровень сформированности самосохранительного поведения // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 12 (138). DOI: 10.23670/IRJ.2023.138.67

15. Факторы субъективного здоровья: структурная модель на этапе поздней социализации / А.А. Данилова, Е.В. Забелина, А.Ю. Телицына, Ю.В. Честюнина // Мониторинг общественного мнения: экономические и социальные перемены. – 2023. – № 6. – С. 144–170. DOI: 10.14515/monitoring.2023.6.2399

16. Вангородская С.А. Факторы самосохранительного поведения населения региона (по результатам эмпирических исследований) // Научный результат. Социология и управление. – 2018. – Т. 4. № 2. – С. 13–26. DOI: 10.18413/2408-9338-2018-4-2-0-2

17. Ryu H., Moon J., Jung J. Sex Differences in Cardiovascular Disease Risk by Socioeconomic Status (SES) of Workers Using National Health Information Database // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2020. – Vol. 17, № 6. – P. 2047. DOI: 10.3390/ijerph17062047

18. Favorable Working Conditions Related to Health Behavior Among Nurses and Care Assistants in Sweden / M. Helgesson, S. Marklund, K. Gustafsson, G. Aronsson, C. Leineweber – A Population-Based Cohort Study // Front. Public Health. – 2021. – Vol. 9. – P. 681971. DOI: 10.3389/fpubh.2021.681971

19. Факторный анализ социально-демографических предпосылок формирования туберкулеза у пациентов с хронической обструктивной болезнью легких / Н.В. Багишева, А.В. Мордык, К.И. Нестерова, В.В. Гольтяпин, А.Р. Ароян, С.А. Руденко, Н.В. Ширинская // Вестник современной клинической медицины. – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 7–15. DOI: 10.20969/VSKM.2021.14 (1).7-15

20. Покида А.Н., Зыбуновская Н.В. Здоровье в восприятии россиян и реальные медицинские практики // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. – 2021. – Т. 29, № 7. – С. 19–27. DOI: 10.35627/2219-5238/2021-29-7-19-27

21. Басова Е.А. Региональное неравенство в контексте доступности социально значимых благ: компаративная оценка // The Journal of Social Policy Studies. – 2022. – Т. 20, № 1. – С. 83–98. DOI: 10.17323/727-0634-2022-20-1-83-98

22. Рязанцев С.В., Храмова М.Н., Смирнов А.В. Социально-демографические аспекты вакцинации населения России в контексте пандемии COVID-19 // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. – 2021. – Т. 29, № 5. – С. 1047–1056. DOI: 10.32687/0869-866X-2021-29-5-1047-1056

23. Associations of clustered health risk behaviors with diabetes and hypertension in White, Black, Hispanic, and Asian American adults / W.K. Cook, L. Libo, C.C. Tam, N. Mulia, W.C. Kerr // BMC Public Health. – 2022. – Vol. 22, № 1. – P. 773. DOI: 10.1186/s12889-022-12938-y

24. Проблемно-поисковые подходы к оптимизации питания в целях увеличения потенциала ожидаемой продолжительности жизни с учётом биоинформационных сигналов регуляторной системы человека / Н.В. Зайцева, В.Б. Алексеев, И.В. Май, Д.А. Кирьянов, М.А. Землянова, Д.Р. Хисматуллин, Е.В. Пескова // Гигиена и санитария. – 2024. – Т. 103. № 12. – С. 1494–1503. DOI: 10.47470/0016-9900-2024-103-12-1494-1503

25. Козина И.М., Серёжкина Е.В. Оценка психосоциальных рисков и качество трудовой жизни российских профессионалов // Мониторинг общественного мнения: экономические и социальные перемены. – 2021. – № 3. – С. 21–40. DOI: 10.14515/ monitoring.2021.3.1891

26. Покида А.Н., Зыбуновская Н.В. Различия в поведенческих практиках по сохранению и укреплению здоровья среди работников умственного и физического труда // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. – 2022. – № 9. – С. 18–28. DOI: 10.35627/2219-5238/2022-30-9-18-28

27. Chinese Residents' Healthy Eating Intentions and Behaviors: Based on an Extended Health Belief Model / Y. Wang, X. Wen, Y. Zhu, Y. Xiong, X. Liu // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2022. – Vol. 19, № 15. – P. 9037. DOI: 10.3390/ijerph19159037

28. Покида А.Н., Зыбуновская Н.В. Культура питания российского населения (по результатам социологического исследования) // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. – 2022. – Т. 30, № 2. – С. 13–22. DOI: 10.35627/2219-5238/2022-30-2-13-22

29. Structural Factors Affecting Health Examination Behavioral Intention / H.-T. Huang, Y.-M. Kuo, S.-R. Wang, C.-F. Wang, C.-H. Tsai // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2016. – Vol. 13, № 4. – P. 395. DOI: 10.3390/ijerph13040395

30. Parental and peer social support is associated with healthier physical activity behaviors in adolescents: a cross-sectional analysis of Texas School Physical Activity and Nutrition (TX SPAN) data / A. Haidar, N. Ranjit, N.P. Archer, D.M. Hoelscher // BMC Public Health. – 2019. – Vol. 19. – P. 640. DOI: 10.1186/s12889-019-7001-0

31. Workplace Social and Organizational Environments and Healthy-Weight Behaviors / R.G. Tabak, J.A. Hipp, C.M. Marx, R.C. Brownson // PLoS One. – 2015. – Vol. 10, № 4. – P. e0125424. DOI: 10.1371/journal.pone.0125424

32. Prediction of Seat Belt Use Behavior among Adolescents Based on the Theory of Planned Behavior / F. Malekpour, B. Moeini, L. Tapak, H. Sadeghi-Bazargani, F. Rezapur-Shahkolai // J. Res. Health Sci. – 2021. – Vol. 21, № 4. – P. e00536. DOI: 10.34172/jrhs.2021.71

33. Попова Л.А., Милаева Т.В., Зорина Е.Н. Самосохранительное поведение населения: поколенческий аспект // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2021. – Т. 14, № 5. – С. 261–276. DOI: 10.15838/esc.2021.5.77.15

34. Локосов В.В., Ярашева А.В, Александрова О.А. Факторы формирования основ самосохранительного поведения населения // Народонаселение. – 2024. – Т. 27, № 1. – С. 192–205. DOI: 10.24412/1561-7785-2024-1-192-205

35. Brügger A., Höchli B. The Role of Attitude Strength in Behavioral Spillover: Attitude Matters – But Not Necessarily as a Moderator // Front. Psychol. – 2019. – Vol. 10. – P. 1018. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.01018

36. Шлыкова Е.В. Отношение к риску как дифференцирующий фактор выбора способа вынужденной адаптации // Спутник ежегодника «Россия реформирующаяся». – 2016. – Вып. 2. – С. 1–15.

37. Lakon C.M., Zheng Y., Pechmann C. Social network tie functions of social support and social influence and adult smoking abstinence // PLoS One. – 2024. – Vol. 19, № 3. – P. e0296458. DOI: 10.1371/journal.pone.0296458

38. Kawachi I., Adler N.E., Dow W.H. Money, schooling, and health: Mechanisms and causal evidence // Ann. N Y Acad. Sci. – 2010. – Vol. 1186. – P. 56–68. DOI: 10.1111/j.1749-6632.2009.05340.x

39. Subjective Socioeconomic Status, Cognitive Abilities, and Personal Control: Associations With Health Behaviours / P. Kraft, B. Kraft, T. Hagen, T. Espeseth // Front. Psychol. – 2022. – Vol. 12. – P. 784758. DOI: 10.3389/fpsyg.2021.784758

40. Галкина Е.П., Кадничанская М.И., Власова Н.В. Типология самосохранительного поведения населения в условиях пандемии // Logos et Praxis. – 2022. – Т. 21, № 3. – С. 144–155. DOI: 10.15688/lp.jvolsu.2022.3.15

41. Аксенова Е.И., Камынина Н.Н., Турзин П.С. Городской стресс жителя мегаполиса: стрессогенные факторы и коррекция // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. – 2023. – № 31 (спецвыпуск 2). – С. 1087–1091. DOI: 10.32687/0869-866X-2023-31-s2-1087-1091

42. Резервы и ограничения роста ожидаемой продолжительности жизни населения промышленного региона, связанные с потерями по причине болезней системы кровообращения / Н.В. Зайцева, В.Г. Костарев, С.В. Клейн, М.В. Глухих, Д.А. Кирьянов // Здравоохранение Российской Федерации. – 2024. – Т. 68, № 6. – С. 480–487. DOI: 10.47470/0044-197X-2024-68-6-480-487

Гордеева С.С., Шарыпова С.Ю., Шляпина А.С. Факторы самосохранительного и рискогенного поведения трудоспособного населения промышленного мегаполиса // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 2. – С. 60–72. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.05

UDC 614+316.622
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.05.eng

Read online

Research article

FACTORS OF SELF-PRESERVATION AND RISKY BEHAVIOR OF EMPLOYABLE POPULATION IN AN INDUSTRIAL MEGALOPOLIS

S.S. Gordeeva, S.Yu. Sharypova, A.S. Shlyapina

Perm State University, 15 Bukireva St., Perm, 614990, Russian Federation

Socio-economic stability of any state is determined by the health of employable population, formed by an individual's behavior, which can be aimed both at preserving health (self-preservation) and at its destruction (risky behavior).

Based on literature analysis, three groups of factors have been identified that determine an individual's behavior in the field of health: socio-biological, socio-economic, and socio-psychological. These factors gave grounds for developing a mathematical model of multifactorial causation of self-preservation and risky behavior pursued by employable population living in an industrial megacity. The empirical base was formed by data from a formalized survey conducted in 2025 among residents of Perm city (n = 582). The data were analyzed using the SPSS Statistics software. The model was built using the neural network procedure of the multilayer perceptron (MLP).

The study has found that health behavior of employable population living in Perm is characterized by a moderate risk profile. This is reflected in a moderate level of commitment to physical activity and medical practices, as well as relatively low manifestation of addictions. The factors identified in the study have a complex interrelationship. At the same time, there is a lack of an unambiguous link between health attitudes and actual implementation of consistent health-preserving behavior. Social support functions as a factor contributing to health preservation, but only with moderate intensity; its excessive manifestation can negate an individual's personal responsibility. In addition, influence of social connections has a bilateral effect: they can both provide support and contribute to formation of unhealthy behaviors through normative pressure. A high level of subjective security perception contributes to increased inclination for self-preservation behavior, while a decrease in this perception initiates the opposite process.

The study highlights complex mechanisms of interaction between factors and self-preservation behavior pointing out that practices aimed at preserving health do not always manifest themselves in a systematic and sustainable form. The results substantiate the necessity to conduct investigative search for additional components forming the structure of self-preservation behavior in addition to behavioral practices. Preventive approaches to reducing risky behavior among employable population should take into account specific factors, which determine this behavior in various social groups, and adapt to their specific needs.

Keywords: *risky behavior, self-preservation behavior, health, employable population, multifactorial causation, neural network modeling.*

© Gordeeva S.S., Sharypova S.Yu., Shlyapina A.S., 2025

Svetlana S. Gordeeva – Candidate of Sociological Sciences, Associate Professor at the Department of Sociology (e-mail: SSGordeyeva@mail.ru; tel.: +7 (342) 239-63-29; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5309-8318).

Sofya Yu. Sharypova – Candidate of Sociological Sciences, Associate Professor at the Department of Sociology (e-mail: sonia.eliseeva@bk.ru; tel.: +7 (342) 239-63-29; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3519-8531).

Anastasiya S. Shlyapina – assistant at the Department of Sociology, sociologist of the Center for Sociological Research (e-mail: shlyapina.psu@mail.ru; tel.: +7 (342) 239-66-93; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5398-2891).

References

1. Staykova A.P., Titopoulou M. Study on the Behavioral Health Risk Factors of Sewing Industry Workers in Bulgaria. *European Journal of Economics and Business Studies*, 2017, vol. 3, no. 2, pp. 200–211. DOI: 10.26417/ejes.v8i1.p200-211
2. Park J., Kim Y. From Workers to the Working-Age Population: A New Paradigm for the Occupational Health Service. *Saf. Health Work*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 251–253. DOI: 10.1016/j.shaw.2019.07.002
3. Vasilieva T.P., Larionov A.V. A Conceptual Approach to Managing the Behavioral Determinant of Public Health. *ZNiSO*, 2025, vol. 33, no. 1, pp. 7–17. DOI: 10.35627/2219-5238/202533-1-7-17 (in Russian).
4. Kleyn S.V., Onishchenko G.G., Zaitseva N.V., Glukhikh M.V. Life expectancy at birth in rf regions with diriment sanitary-epidemiological wellbeing and different lifestyles. management reserves. *Health Risk Analysis*, 2022, no. 4, pp. 18–32. DOI: 10.21668/health.risk/2022.4.02.eng
5. Zubok Yu.A., Prokazina N.V. The attitude of young people to the new coronavirus infection: the dynamics of ideas and practices of health-saving behavior. *Problemy sotsial'noi gigieny, zdravookhraneniya i istorii meditsiny*, 2021, vol. 29, no. s1, pp. 752–757. DOI: 10.32687/0869-866X-2021-29-s1-752-757 (in Russian).
6. Ryazanova E.A. To the problem of typology of the riskogenic behaviour (analysis on the example of an industrial enterprise of Perm region). *Health Risk Analysis*, 2016, no. 2, pp. 68–75. DOI: 10.21668/health.risk/2016.2.08.eng
7. Kislitsyna O.A. Social inequality in the health status of Russians: the role of material, psychosocial and behavioral factors. *Sotsial'nye aspekty zdorov'ya naseleniya*, 2023, vol. 69, no. 3, pp. 7. DOI: 10.21045/2071-5021-2023-69-3-7 (in Russian).
8. Korolenko A.V. Patterns of population's self-preservation behavior: research approaches and building experience. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2018, vol. 11, no. 3, pp. 248–263. DOI: 10.15838/esc.2018.3.57.16
9. Kovaleva A.A. Samosokhranitel'noe povedenie v sisteme faktorov, okazyvayushchikh vliyanie na sostoyanie zdorov'ya [Self-preservation behavior in the system of factors influencing health]. *Zhurnal sotsiologii i sotsial'noi antropologii*, 2008, vol. XI, no. 2, pp. 179–191 (in Russian).
10. Nazarova I.B. Monitoring of the population health and health risk factors (research methodology). *Vestnik RUDN. Seriya: Sotsiologiya*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 616–629. DOI: 10.22363/2313-2272-2022-22-3-616-629 (in Russian).
11. Rostovskaya T.K., Ivanova A.K., Kniazkova E.A. The practice of self-preserving behavior of the citizen of the Russian Federation: the results of the All-Russian sociological study "The demographic self-feeling of Russia". *Problemy sotsial'noi gigieny, zdravookhraneniya i istorii meditsiny*, 2021, vol. 29, no. 1, pp. 66–75. DOI: 10.32687/0869-866X-2021-29-1-66-75 (in Russian).
12. Yanitsky O. The reasons and consequences of modern war: a sociological view. *Institute of Sociology of Russian Academy of Sciences*, 2015, 172 p. Available at: http://www.isras.ru/publ.html?id=3298 (April 29, 2025) (in Russian).
13. Bush J., White M., Kai J., Rankin J., Bhopa R. Understanding influences on smoking in Bangladeshi and Pakistani adults: community based, qualitative study. *BMJ*, 2003, vol. 326, no. 7396, pp. 962. DOI: 10.1136/bmj.326.7396.962
14. Barakhoeva R.B. Factors Influencing the Level of Formation of Self-Preservation Behaviour. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2023, no. 12 (138). DOI: 10.23670/IRJ.2023.138.67 (in Russian).
15. Danilova A.A., Zabelina E.V., Telitsyna A.Y., Chestyunina Y.V. Factors of Subjective Health: Structural Model in the Period of Late Socialization. *Monitoring obshchestvennogo mneniya: ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny*, 2023, no. 6, pp. 144–170. DOI: 10.14515/monitoring.2023.6.2399 (in Russian).
16. Vangorodskaya S.A. The factors of self-preservation behavior of the population in the region (based on empirical studies). *Nauchnyi rezul'tat. Sotsiologiya i upravlenie*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 13–26. DOI: 10.18413/2408-9338-2018-4-2-0-2 (in Russian).
17. Ryu H., Moon J., Jung J. Sex Differences in Cardiovascular Disease Risk by Socioeconomic Status (SES) of Workers Using National Health Information Database. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2020, vol. 17, no. 6, pp. 2047. DOI: 10.3390/ijerph17062047
18. Helgesson M., Marklund S., Gustafsson K., Aronsson G., Leineweber C. Favorable Working Conditions Related to Health Behavior Among Nurses and Care Assistants in Sweden – A Population-Based Cohort Study. *Front. Public Health*, 2021, vol. 9, pp. 681971. DOI: 10.3389/fpubh.2021.681971
19. Bagisheva N.V., Mordyk A.V., Nesterova K.I., Goltyapin V.V., Aroyan A.R., Rudenko S.A., Shirinskaya N.V. Factor analysis of socio-demographic preconditions for tuberculosis development in patients with chronic obstructive lung disease. *Vestnik sovremennoi klinicheskoi meditsiny*, 2021, vol. 14, no. 1, pp. 7–15. DOI: 10.20969/VSKM.2021.14(1).7-15 (in Russian).
20. Pokida A.N., Zybunovskaya N.V. Health in the Perception of Russians and Real Medical Practices. *ZNiSO*, 2021, vol. 29, no. 7, pp. 19–27. DOI: 10.35627/2219-5238/2021-29-7-19-27 (in Russian).
21. Basova E. Regional Inequality in the Context of the Availability of Socially Significant Benefits: Comparative Assessment. *The Journal of Social Policy Studies*, 2022, vol. 20, no. 1, pp. 83–98. DOI: 10.17323/727-0634-2022-20-1-83-98 (in Russian).
22. Ryazantsev S.V., Khramova M.N., Smirnov A.V. The social demographic aspects of vaccination of population of Russia in the context of COVID-19 pandemic. *Problemy sotsial'noi gigieny, zdravookhraneniya i istorii meditsiny*, 2021, vol. 29, no. 5, pp. 1047–1056. DOI: 10.32687/0869-866X-2021-29-5-1047-1056 (in Russian).
23. Cook W.K., Libo L., Tam C.C., Mulia N., Kerr W.C. Associations of clustered health risk behaviors with diabetes and hypertension in White, Black, Hispanic, and Asian American adults. *BMC Public Health*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 773 DOI: 10.1186/s12889-022-12938-y
24. Zaitseva N.V., Alekseev V.B., May I.V., Kiryanov D.A., Zemlyanova M.A., Khismatullin D.R., Peskova E.V. Problem Searching approaches to nutrition optimization to increase the potential of life expectancy taking into account bioinformatic signals of the human regulatory system. *Gigiena i sanitariya*, 2024, vol. 103, no. 12, pp. 1494–1503. DOI: 10.47470/0016-9900-2024-103-12-1494-1503 (in Russian).

25. Kozina I.M., Serezhkina E.V. Measuring Psychosocial Risks and Quality of Work Life Among Russian Professionals. *Monitoring obshchestvennogo mneniya: ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny*, 2021, no. 3, pp. 21–40. DOI: 10.14515/monitoring.2021.3.1891 (in Russian).

26. Pokida A.N., Zybunovskaya N.V. Differences in Behavioral Practices of Health Maintenance and Promotion between Knowledge and Manual Workers. *ZNiSO*, 2022, no. 9, pp. 18–28. DOI: 10.35627/2219-5238/2022-30-9-18-28 (in Russian).

27. Wang Y., Wen X., Zhu Y., Xiong Y., Liu X. Chinese Residents' Healthy Eating Intentions and Behaviors: Based on an Extended Health Belief Model. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2022, vol. 19, no. 15, pp. 9037. DOI: 10.3390/ijerph19159037

28. Pokida A.N., Zybunovskaya N.V. Food Culture of the Russian Population: Results of a Sociological Survey. *ZNiSO*, 2022, vol. 30, no. 2, pp. 13–22. DOI: 10.35627/2219-5238/2022-30-2-13-22 (in Russian).

29. Huang H.-T., Kuo Y.-M., Wang S.-R., Wang C.-F., Tsai C.-H. Structural Factors Affecting Health Examination Behavioral Intention. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2016, vol. 13, no. 4, pp. 395. DOI: 10.3390/ijerph13040395

30. Haidar A., Ranjit N., Archer N.P., Hoelscher D.M. Parental and peer social support is associated with healthier physical activity behaviors in adolescents: a cross-sectional analysis of Texas School Physical Activity and Nutrition (TX SPAN) data. *BMC Public Health*, 2019, vol. 19, pp. 640. DOI: 10.1186/s12889-019-7001-0

31. Tabak R.G., Hipp J.A., Marx C.M., Brownson R.C. Workplace Social and Organizational Environments and Healthy-Weight Behaviors. *PLoS One*, 2015, vol. 10, no. 4, pp. e0125424. DOI: 10.1371/journal.pone.0125424

32. Malekpour F., Moeini B., Tapak L., Sadeghi-Bazargani H., Rezapur-Shahkolai F. Prediction of Seat Belt Use Behavior among Adolescents Based on the Theory of Planned Behavior. *J. Res. Health Sci.*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. e00536. DOI: 10.34172/jrhs.2021.71

33. Popova L.A., Milaeva T.V., Zorina E.N. Self-preservation behavior: generational aspect. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2021, vol. 14, no. 5, pp. 261–276. DOI: 10.15838/esc.2021.5.77.15

34. Lokosov V.V., Yarasheva A.V., Aleksandrova O.A. Factors forming the foundations for self-preservation behavior of the population. *Narodonaselenie*, 2024, vol. 27, no. 1, pp. 192–205. DOI: 10.24412/1561-7785-2024-1-192-205 (in Russian).

35. Brügger A., Höchli B. The Role of Attitude Strength in Behavioral Spillover: Attitude Matters – But Not Necessarily as a Moderator. *Front. Psychol.*, 2019, vol. 10, pp. 1018. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.01018

36. Shlykova E.V. Otnoshenie k risku kak differentsiruyushchii faktor vybora sposoba vynuzhdennoi adaptatsii [Attitude to risk as a differentiating factor in selecting a method of forced adaptation]. *Sputnik ezhegodnika «Rossiya reformiruyushchayasya»*, 2016, iss. 2, pp. 1–15 (in Russian).

37. Lakon C.M., Zheng Y., Pechmann C. Social network tie functions of social support and social influence and adult smoking abstinence. *PLoS One*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. e0296458. DOI: 10.1371/journal.pone.0296458

38. Kawachi I., Adler N.E., Dow W.H. Money, schooling, and health: Mechanisms and causal evidence. *Ann. N Y Acad. Sci.*, 2010, vol. 1186, pp. 56–68. DOI: 10.1111/j.1749-6632.2009.05340.x

39. Kraft P., Kraft B., Hagen T., Espeseth T. Subjective Socioeconomic Status, Cognitive Abilities, and Personal Control: Associations With Health Behaviours. *Front. Psychol.*, 2022, vol. 12, pp. 784758. DOI: 10.3389/fpsyg.2021.784758

40. Galkina E.P., Kadnichanskaya M.I., Vlasova N.V. Typology of self-preservation behavior of the population in a pandemic. *Logos et Praxis*, 2022, vol. 21, no. 3, pp. 144–155. DOI: 10.15688/lp.jvolsu.2022.3.15 (in Russian).

41. Aksenova E.I., Kamynina N.N., Turzin P.S. Urban stress of a megalopolis resident: stress factors and correction. *Problemy sotsial'noi gigieny, zdravookhraneniya i istorii meditsiny*, 2023, no. 31 (s2), pp. 1087–1091. DOI: 10.32687/0869-866X-2023-31-s2-1087-1091 (in Russian).

42. Zaitseva N.V., Kostarev V.G., Kleyn S.V., Glukhikh M.V., Kiryanov D.A. Reserves and limitations of the gain in life expectancy at birth for people in an industrially developed region associated with losses due to circulatory diseases. *Zdravookhranenie Rossiiskoi Federatsii*, 2024, vol. 68, no. 6, pp. 480–487. DOI: 10.47470/0044-197X-2024-68-6-480-487 (in Russian).

Gordeeva S.S., Sharypova S.Yu., Shlyapina A.S. Factors of self-preservation and risky behavior of employable population in an industrial megalopolis. Health Risk Analysis, 2025, no. 2, pp. 60–72. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.05.eng

Получена: 10.03.2025
Одобрена: 06.05.2025
Принята к публикации: 14.06.2025

УДК 613; 614
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.06

Читать онлайн

Научный обзор

ФАКТОРЫ И СТРАТЕГИИ СНИЖЕНИЯ РИСКА ЗДОРОВЬЮ ИНОСТРАННЫХ СТУДЕНТОВ ПРИ ОБУЧЕНИИ В РОССИЙСКИХ ВУЗАХ

Л.В. Кириченко[1], М.В. Киланова[1], М.В. Глухих[1,2]

[1]Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера, Российская Федерация, 614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, 26
[2]Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения, Российская Федерация, 614045, г. Пермь, ул. Монастырская, 82

В настоящее время изучение влияния факторов внутривузовской среды на здоровье иностранных студентов является актуальным направлением исследований. Цель данного исследования состояла в обобщении и анализе данных научной литературы, посвященных изучению факторов риска для здоровья иностранных студентов, связанных с обучением в российских вузах, анализом стратегий адаптации, направленных на улучшение физического и психического благополучия иностранных граждан, в том числе для задач повышения эффективности их обучения.

Дизайн исследования – описательный обзор, подразумевающий качественное описание научной литературы, отобранной по установленным ключевым словам. Общий объем проанализированных статей составил 325, использованных в анализе – 62.

Затрагиваются проблемы, с которыми могут сталкиваться иностранные студенты в процессе обучения в вузе. Современная система высшего образования характеризуется академической мобильностью. Численность иностранных студентов в высших учебных заведениях колеблется от 10 до 40 %. Иностранным студентам, приехавшим из стран с разными геоклиматическими и культурными традициями, приходится проходить длительный адаптационный период.

Выявлено, что внутривузовская среда включает в себя комплекс многогранных факторов, а именно: образовательное пространство, социальная сфера, аспекты физической, технологической, финансовой и психологической сторон. Каждый фактор способствует не только академическим успехам иностранных студентов, но и их личностному развитию и интеграции в общество.

Установлено, что успешность образовательного процесса у иностранных граждан зависит от условий обучения, времени и качества адаптационного периода, а также от профессионализма профессорско-преподавательского состава.

Кроме того, было доказано, что здоровье иностранных студентов является важным аспектом, который включает в себя физическое, психологическое и социальное благополучие. Под влиянием условий внутривузовской среды студенты могут быть подвержены заболеваниям нервной и костно-мышечной систем, органов дыхания, глаза и его придаточного аппарата, желудочно-кишечного тракта, а также паразитарным болезням.

Основываясь на проанализированных отечественных и зарубежных работах, можно заключить, что внутривузовская среда для иностранных граждан является фактором риска для их здоровья.

Ключевые слова: *иностранные студенты, факторы риска, здоровье, адаптация, внутривузовская среда, высшее образование, студенческая мобильность.*

Наблюдаемые в настоящее время процессы глобализации, характеризующиеся «… *потоком технологий, экономики, знаний, людей, ценностей и идей* …», способствуют в том числе росту академической мобильности ученых, преподавателей и студентов[1] [1]. Феномен интернационализации высшего образования вызывает все больший научный интерес в теоретическом и практическом аспектах [2]. Появление данного феномена подстегнуло академический интерес с соответствующим ростом корпуса научных исследований [3], использующих различные теории и методы (Push Pull Model, Human

© Кириченко Л.В., Киланова М.В., Глухих М.В., 2025

Кириченко Лариса Викторовна – доктор медицинских наук, заведующий кафедрой общей гигиены и профильных гигиенических дисциплин (e-mail: lkv-7@yandex.ru; тел.: 8 (342) 212-10-07; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6306-1757).

Киланова Мария Викторовна – преподаватель кафедры общей гигиены и профильных гигиенических дисциплин (e-mail: marya.kilanova@yandex.ru; тел.: 8 (342) 212-09-13; ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3182-0867).

Глухих Максим Владиславович – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник отдела системных методов санитарно-гигиенического анализа и мониторинга (e-mail: gluhih@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-18-04; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4755-8306).

[1] Quality and Internationalisation in Higher Education: Report / ed. by H. De Wit, J. Knight // OECD. – 1999. – 272 p. DOI: 10.1787/9789264173361-en

Capital Theory, Signalling Theory и др.) по данному вопросу в различных контекстуальных (страновых) условиях [4]. За последние десятилетия наблюдалось несколько волн студенческой мобильности, которые в том числе связывают с рядом кризисных событий мирового уровня [5].

В соответствии с ныне недействующим Указом[2] Президента Российской Федерации (РФ), включавшим решение задачи по *«увеличению не менее чем в два раза количества иностранных граждан, обучающихся в образовательных организациях высшего образования …»* с *«… реализацией комплекса мер по трудоустройству лучших из них в Российской Федерации»*, разработан и действует федеральный проект «Экспорт образования»[3], закрепляющий целевое увеличение численности данной группы студентов до 425 тысяч к 2024 г. Актуальный документ[4], устанавливающий национальные цели развития РФ, предусматривает *«увеличение к 2030 году численности иностранных студентов, … не менее чем до 500 тыс. человек»*. Помимо имиджевой цели – повышение привлекательности российского образования на международном уровне, данные задачи решают экономический вопрос в части наращивания несырьевого экспорта страны, а также интеграции наиболее успешных выпускников в российскую экономику. В связи с этим российские вузы активно вовлечены в процесс образования иностранных студентов, которые будут играть значимую роль в формировании интеллектуального и инновационного потенциала как своих стран, так и РФ.

По данным Министерства науки и высшего образования РФ, число иностранных студентов в российских вузах неуклонно растет и составляет 429,4 тысячи человек[5] на январь 2025 г., что на 33,7 % больше относительно 2018 г. (321,3 тысячи человек). Этот факт может свидетельствовать о растущей востребованности российского образования на международном рынке образовательных услуг. Соответственно российская образовательная система должна быть готова к прогнозируемому увеличению иностранных студентов с учетом особенностей их адаптации к новым условиям.

Иностранные студенты, помимо привычных для всех учащихся высших учебных заведений факторов, воздействующих на их здоровье, адаптируются к новым социокультурным, климатическим условиям, образовательным системам / традициям, что требует повышенных резервных возможностей организма, в отличие от «нативных» студентов.

Переезд в другую страну сопряжен с необходимостью преодоления языкового барьера, адаптации к непривычной системе обучения, изменению рациона и образа жизни, а также с психологическим стрессом, вызванным разрывом привычного круга общения (семья, друзья).

Эти факторы могут негативно сказываться на физическом и психическом здоровье иностранных студентов, снижая их академическую успеваемость и качество жизни [6].

Существующие исследования, посвященные адаптации иностранных студентов, в основном сосредоточены на социально-психологических аспектах, таких как преодоление культурного шока, интеграция в студенческое сообщество и формирование межкультурной компетентности [7].

Вместе с тем недостаточно внимания уделяется изучению влияния условий обучения в российских вузах на здоровье иностранных студентов и разработке эффективных стратегий адаптации, направленных на сохранение и укрепление их физического и психического благополучия. Недооценка влияния факторов риска, связанных с внутривузовской средой, на состояние здоровья иностранных студентов может привести к увеличению заболеваемости, снижению академической успеваемости и в конечном счете отчислению из вуза и проблемам со здоровьем.

В связи с этим имеется необходимость в систематическом анализе факторов риска для здоровья иностранных студентов, связанных с обучением в российских вузах, а также применяемых комплексных программ адаптации, направленных на минимизацию негативного воздействия от данных факторов.

Цель исследования – систематизация и анализ отечественной и зарубежной литературы, посвященной изучению факторов риска для здоровья иностранных студентов, связанных с обучением в российских вузах, а также анализ методов (стратегий) адаптации, направленных на сохранение и улучшение физического и психического благополучия иностранных студентов, повышение эффективности их обучения.

---

[2] О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года: Указ Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 [Электронный ресурс] // Президент России. – URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027 (дата обращения: 30.04.2025).

[3] Паспорт национального проекта «Образование» / утв. Президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам; протокол от 24.12.2018 № 16.

[4] О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года: Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309 [Электронный ресурс] // Президент России. – URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542 (дата обращения: 30.04.2025).

[5] Количество иностранных граждан, обучающихся в организациях, осуществляющих образовательную деятельность по образовательным программам высшего образования [Электронный ресурс] // ЕМИСС: государственная статистика.– URL: https://fedstat.ru/indicator/59950# (дата обращения: 02.03.2025).

Задачи:

– идентифицировать и классифицировать основные факторы риска для здоровья иностранных студентов, связанные с обучением в российских вузах (академические, социокультурные, экономические, медицинские);

– оценить влияние данных факторов на физическое и психическое здоровье иностранных студентов;

– проанализировать существующие подходы и стратегии адаптации иностранных студентов в российских вузах.

Материалы и методы. Настоящая обзорная статья представляет собой нарративный (описательный) анализ научной литературы, посвященный изучению влияния на здоровье иностранных студентов условий обучения в российских вузах.

В качестве источников информации использовались научные статьи, опубликованные на русском и английском языках в ведущих базах данных, таких как PubMed, Scopus, Web of Science, eLIBRARY.ru, а также материалы конференций, монографии и отчеты, находящиеся в открытом доступе. Поиск литературы проводился с использованием ключевых слов, отражающих тематику исследования: «иностранные студенты», «адаптация», «факторы риска», «здоровье», «вуз» и их синонимы, в том числе на английском языке. Поиск не ограничивался определенными временными рамками, чтобы охватить максимально широкий спектр научных работ по данной проблематике. Из источников литературы по ключевым словам было отобрано 325 статей для анализа. В данный обзор включено 64 статьи, исходя из доступности и полноценности результатов.

Ввиду выбранного вида обзора (описательный) не применялись строгие критерии включения / исключения анализируемых источников. Отбор материалов осуществлялся на основе релевантности теме исследования и качества представленных данных. Приоритет отдавали исследованиям, описывающим опыт российских вузов, а также работам, представляющим результаты эмпирических исследований и систематических обзоров. Количественный анализ результатов исследований из источников не проводился, основное внимание уделено качественному анализу и систематизации информации о факторах риска для здоровья иностранных студентов и стратегиях их адаптации.

В процессе анализа была проведена систематизация информации о факторах риска, классифицированных по категориям (академические, социокультурные, экономические, медицинские), а также оценка эффективности различных стратегий адаптации иностранных студентов, предлагаемых в исследованной литературе.

Результаты и их обсуждение. ***Факторы риска, влияющие на здоровье иностранных студентов в российских вузах.*** Факторы внутривузовской среды оказывают многогранное воздействие на иностранных студентов, в том числе обусловливая возникновение рисков в отношении их физического и психического здоровья на протяжении срока обучения. Данные факторы условно можно разделить на следующие категории: академические (связанные с процессами обучения), социокультурные, экономические и медико-экологические.

Академические факторы. Российская система высшего образования часто характеризуется высокой интенсивностью обучения, большим объемом учебных часов (более 1200 ч аудиторных занятий в год) и самостоятельной работы (33 % от общего количества академических часов). Это может приводить к переутомлению, стрессу, снижению работоспособности, хроническому недосыпанию и, как следствие, к ослаблению иммунитета и повышению восприимчивости к инфекционным заболеваниям. Так, исследования, проведенные в Хакасском государственном университете им. Н.Ф. Катанова, показали, что 43 % обследованных студентов имели признаки транзиторной иммунной недостаточности. У студентов северных вузов на начальных курсах обучения были выявлены дефицит иммуноглобулина А и более активные реакции лимфопролиферации, а на последних курсах обучения возрастало напряжение клеточно-опосредованных механизмов защиты [8, 9].

Недостаточное владение русским языком является одним из основных препятствий для иностранных студентов при обучении в российских вузах. Это приводит к сложностям в понимании лекций, выполнении заданий, сдаче экзаменов, чувству неуверенности, тревожности, снижению самооценки и академической неуспеваемости [10–13].

Иностранные студенты в процессе обучения в вузе могут столкнуться с различиями относительно привычной им системы образования: в структуре учебного процесса, формах контроля знаний, методах оценки, что требует адаптации высшей нервной деятельности к новым требованиям, усиливая стрессогенное воздействие на организм [14, 15].

Отсутствие или недостаток поддержки со стороны преподавательского состава может усугублять трудности в адаптации, что негативно влияет на академическую успеваемость и мотивацию к дальнейшему обучению [16–18].

Различия в программах подготовки в получении начального, среднего образования в разных странах могут приводить к несоответствию исходного уровня знаний иностранных студентов требованиям российских вузов, что требует от них дополнительных усилий для восполнения пробелов в знаниях и может также привести к стрессовым состояниям [19].

Социокультурные факторы. Обучение специалистов, магистрантов и бакалавров имеет достаточно длительный срок (от двух до шести лет) и непосредственно связано с местом проживания студентов, социальной и культурной обстановкой, которые в совокупности могут являться как саноген-

ными / здоровьесберегательными факторами, так и факторами риска для здоровья.

Переезд в другую страну, знакомство с новой культурой, традициями, обычаями, нормами поведения, системами ценностей может вызывать «культурный шок» – состояние дезориентации, тревоги, разочарования и раздражительности [20]. Трудности межкультурной коммуникации, связанные с языковым барьером и различиями в коммуникативных стилях, могут приводить к недопониманию, конфликтам и чувству отчуждения [21–23].

Оторванность от привычного круга общения (семья, друзья), привычной социальной среды, сложности в установлении социальных контактов в новой стране могут приводить к чувству одиночества, социальной изоляции, депрессии [24–26].

Помимо этого, иностранные студенты могут сталкиваться с дискриминацией, предвзятым отношением, расизмом и ксенофобией, что негативно влияет на их самооценку, психологическое состояние и социальную интеграцию [27–29].

Отсутствие развитой системы социальной поддержки для иностранных студентов (например, менторские программы, группы взаимопомощи) может усугубить трудности адаптации и снизить ощущение безопасности и комфорта [30, 31].

Экономические факторы. Высокая стоимость обучения и проживания, недостаточное количество и размер стипендий, трудности с поиском подработки могут приводить к финансовым трудностям, ограниченному доступу к медицинским услугам, некачественному питанию и ухудшению условий проживания [32, 33].

Проживание в общежитиях с невысоким уровнем комфорта, удаленность от вуза, высокая стоимость аренды жилья (15–40 тысяч рублей) могут негативно влиять на физическое и психическое здоровье студентов [34].

Незнание местной кухни, иной / ограниченный выбор продуктов, высокие цены на продукты питания (средняя стоимость минимальной продуктовой корзины в 2025 г. составляет 7326 руб.) могут приводить к несбалансированному питанию, дефициту макро- и микроэлементов и, как следствие, к ухудшению здоровья [35, 36].

Медико-экологические факторы. Большая часть территории России имеет четко выраженную сезонность климата с разделением на холодный и теплый периоды года с соответствующими изменениями инсоляционного, температурно-влажностного режимов погоды. В зависимости от региона России показатели температуры и влажности воздуха могут колебаться от -50 ^{0}C в холодный период года до 35 ^{0}C и выше в теплый. Данные обстоятельства ассоциированы с множеством других факторов: уровни освещенности и инсоляции, способствующие развитию D-витаминной недостаточности, особенно у иностранных студентов, приезжающих из стран с теплым климатом (распространенность D-витаминной недостаточности – 60–90 %); сезонная обеспеченность свежими овощами и фруктами (открытый грунт); эндемичные заболевания (клещевой энцефалит, геморрагические лихорадки и др. с распространенностью 5–10 случаев на 1000 иностранных студентов, особенно в весенне-летний период), каждый из которых также может быть потенциальным фактором риска для здоровья. Таким образом, смена климатической зоны влечет за собой вынужденную акклиматизацию, адаптацию к новому режиму дня, рациону и другим условиям проживания, которые могут оказывать влияние на физическое и психическое состояние иностранных студентов [37].

Смена места жительства для иностранных студентов сопровождается не только изменением погодно-климатических факторов, но и привычных факторов окружающей среды (качество атмосферного воздуха, питьевой воды, почвы селитебных территорий, уровни шумовой нагрузки), особенно на урбанизированных территориях, на которых чаще всего располагаются вузы и которые имеют относительно более частые проблемы[6] санитарно-эпидемиологического характера.

Проживание в общежитиях с высокой плотностью населения (2–6 человек на комнату; в зависимости от типа общежития, заполняемость общежития достигает 80–90 % в течение учебного года), контакт с большим количеством людей, несоблюдение или незнание санитарных норм и правил личной гигиены могут повышать риск заражения инфекционными заболеваниями, особенно в ранние периоды адаптации [38, 39].

Трудности с оформлением медицинской страховки, языковой барьер при общении с врачами, незнание системы здравоохранения могут затруднять получение своевременной медицинской помощи и приводить к поздней диагностике и лечению заболеваний[7].

В конечном счете состояния стресса, тревоги, депрессии, вызванные процессами адаптации к новым условиям, сами по себе являются факторами риска и могут приводить к развитию психосоматических расстройств (головные боли, боли в животе, нарушения сна и т.д.) [40–42].

Влияние факторов риска внутривузовской среды на состояние здоровья иностранных студентов. Воздействие вышеперечисленных факторов

[6] О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году: Государственный доклад. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2024. – 364 с.

[7] Miller D.F., Harwell D.J. International students at an American university: health problems and status // J. Sch. Health. – 1983. – Vol. 53, № 1. – P. 45–49. DOI: 10.1111/j.1746-1561.1983.tb04053.x

риска без соответствующих мер по адаптации может увеличивать заболеваемость среди иностранных студентов, проявляющуюйся в различных формах.

Болезни нервной системы. В течение первого года обучения студенты под влиянием некоторых условий внутривузовской среды, идентифицированных как факторы риска, испытывают хронический стресс, который провоцирует изменения таких морфофункциональных показателей организма, как индекс массы тела, жизненная емкость легких, артериальное давление, частота сердечных сокращений. Причинами такого стресса на фоне обучения могут быть повышенная учебная нагрузка, низкая успеваемость студента, неумение систематизировать полученный материал, бессонница, недостаточный интерес к выбранной специальности, неудовлетворительные бытовые условия, конфликты с одногруппниками и преподавателями. В.В. Руженкова в своей статье отмечает, что частота встречаемости невротических состояний и соматоформных расстройств, связанных со стрессовым фактором, достигает 15 %. Кроме того, исследователями отмечено, что студенты с пониженной стрессоустойчивостью подвержены появлению тревожных, депрессивных состояний (10–15 %), более раздражительны и эмоционально лабильны [43–46].

Болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани. Современный образ жизни студентов, в том числе иностранных, обусловливает высокий уровень заболеваемости по функциональным отклонениям костно-мышечной системы (нарушения осанки, сколиоз и пр.) ввиду высокой учебной нагрузки, сопряженной с малоподвижным образом жизни. По данным различных исследований, частота заболеваний суставов и опорно-двигательного аппарата может составлять около 10–20 % среди иностранных студентов. Высокий уровень стресса, связанный с учебой и культурной адаптацией, вызывает развитие мышечного напряжения, а постепенное изменение пищевых привычек иностранных студентов сопровождается снижением в крови кальция и витамина D, что соответственно отражается на состоянии здоровья костей и суставов [47].

Болезни органов дыхания. Внутривузовский процесс предполагает высокую частоту контактов с другими людьми в учебной среде, следовательно, повышается риск заболеваний, передающихся воздушно-капельным путем. Частота заболеваемости данным классом также обусловливается несоответствием между иммунным статусом иностранных студентов в части наличия специфических антител и эпидемиологической обстановкой нового места проживания в части структуры инфекционных заболеваний, видового разнообразия микроорганизмов. В связи с этим среди иностранных студентов частота заболеваемости по данному классу заболеваний составляет 30–40 % [48].

Болезни глаза и его придаточного аппарата. Лидирующие позиции по заболеваемости среди студентов, в том числе иностранных, занимают болезни глаза и его придаточного аппарата (миопия – 15–25 %, аллергический конъюнктивит – 10–15 %, синдром сухого глаза – 20–30 %). Студенты на занятиях могут проводить время в неправильной позе или в учебных аудиториях с недостаточными уровнями освещенности, что, в свою очередь, негативно сказывается на органе зрения. Более частое использование цифровых технологий и мобильных устройств может способствовать развитию таких патологий, как нарушение аккомодации, снижение остроты зрения, в том числе миопия, компьютерный зрительный синдром, синдром сухого глаза [49].

Болезни органов пищеварения, болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ. Немаловажным аспектом здоровья иностранных студентов являются проблемы, связанные с рациональностью и сбалансированностью рациона. В своей работе Н.А. Агаджанян обращает внимание, что «*согласно рекомендациям комитета по потребностям в калориях организма и вопросам пищевых продуктов при ООН, с понижением среднемесячной температуры на каждые 10 °С калорийность питания должна увеличиваться на 5 %, считая за исходные +10 °С*» [35]. Исходя из этого, несоответствие исходных пищевых привычек и режима питания иностранных студентов условиям, сложившимся в России, следует рассматривать как фактор риска в развитии и прогрессировании заболеваний желудочно-кишечного тракта. Эпидемиологические данные указывают на значительную распространенность данной патологии среди иностранных студентов, достигающую 20–40 % [50, 51].

Некоторые инфекционные и паразитарные заболевания. Еще одной немаловажной группой заболеваний иностранных студентов являются инфекционные и паразитарные заболевания. По некоторым данным на примере часто и длительно путешествующих людей выявлено, что композиционный состав микрофлоры кишечника может меняться от смены места жительства и приводить к дисбиотическим и иммуннокомпрометированным состояниям [52], вызывая дополнительные издержки для адаптационных механизмов иностранных студентов. К основным факторам риска в развитии инфекционных и паразитарных болезней можно отнести отсутствие или недостаточный уровень знаний о механизмах и путях передачи возбудителей инфекций, несоблюдение или полное отсутствие соблюдения правил личной гигиены. В сочетании с неблагоприятными социокультурными и экономическими факторами данные условия могут снижать общий уровень санитарии, что увеличивает вероятность инфицирования и распространения инфекционных заболеваний и паразитарных инвазий среди данной группы студентов (5–15 % иностранных студентов, приехавших из теплых стран, страдают инфекционными заболеваниями и паразитарными инвазиями) [53]. С другой стороны, по некоторым инфекционным заболеваниям есть

данные, что пребывание в России для иностранных студентов может снижать вероятность заболевания вакциноконтролируемыми инфекциями (корь, краснуха, полиомиелит и др.) и санитарнообусловленными паразитозами (гельминтозы) относительно стран, из которых прибывают студенты.

Подходы к адаптации иностранных студентов. Учитывая многообразие факторов риска и состояний / заболеваний, развитию которых они способствуют, эффективность мероприятий по адаптации иностранных студентов зависит от комплексного подхода, включающего языковую подготовку и поддержку, социально-культурную адаптацию, психологическую поддержку, медицинское сопровождение, финансовую поддержку, улучшение условий проживания.

Языковая подготовка и поддержка. Организация и проведение интенсивных курсов русского языка является важным этапом подготовки студентов перед началом обучения, а также на протяжении всего учебного периода. Такой подход позволяет создавать прочную языковую базу и уверенность в своих силах для успешного усвоения материала. Кроме того, предоставление учебных материалов на нескольких языках способствует лучшему пониманию и восприятию русского языка. Любые сложности, возникающие в процессе обучения, могут быть легко преодолены благодаря наличию разноязычных ресурсов. Особое внимание уделяется языковой поддержке, обеспечению студентов услугами переводчиков и тьюторов, что создает комфортные условия для обучения и помогает лучше усваивать новый материал. Наличие таких специалистов позволяет легко объяснять трудные темы и минимизировать языковые барьеры. Организация языковых клубов и разговорных групп создает дополнительные возможности для практики среди студентов. В такой неформальной обстановке студенты могут обсуждать различные темы, делиться опытом и совершенствовать разговорные навыки, что, в свою очередь, способствует их языковому развитию и уверенности при общении на русском языке [54].

Социально-культурная адаптация. Организация вводных курсов по истории, культуре и традициям России играет ключевую роль в адаптации иностранных студентов к новым условиям. Данные курсы помогают не только познакомиться с богатым наследием страны, но и глубже понять ее общество, что, безусловно, обогащает образовательный процесс, упрощает адаптацию и потенциальную интеграцию будущих специалистов в общество. Важным элементом в адаптации является проведение разнообразных культурных мероприятий, экскурсий и фестивалей, которые позволяют студентам не только ознакомиться с русской культурой и российским обществом, но и активно взаимодействовать с местными жителями. Создание менторских программ, которые направлены на поддержку иностранных студентов, может значительно облегчить процесс адаптации и позволить первокурсникам успешнее войти в учебный процесс и студенческую жизнь. В роли менторов / наставников могут выступать старшекурсники, предоставляющие свои опыт и накопленные знания. Организация встреч с представителями различных национальных диаспор также является важным аспектом адаптации студентов, который создает возможности для обмена культурным опытом и помогает иностранцам ощутить себя частью многонационального сообщества, что, несомненно, способствует их личностному развитию и социальной интеграции [55, 56].

Психологическая поддержка. Возможность психологических консультаций и групповой терапии на родном языке представляет собой еще один аспект адаптации, направленный на поддержку иностранных студентов. Понимание культурных отличий и языковых барьеров может существенно влиять на качество адаптационного процесса, поэтому так важно создавать безопасное пространство, в котором студенты могут открыто обсуждать свои переживания, страхи и тревоги на родном языке. Это способствует более глубокому и искреннему общению, что, в свою очередь, ведет к положительной адаптации. Организация тренингов по управлению стрессом, адаптации к новой среде и межкультурной коммуникации также имеет первостепенное значение. Эти тренинги направлены на развитие навыков, которые помогут студентам научиться справляться с вызовами, связанными с их пребыванием в новой стране. Создание служб психологической поддержки в вузах является логическим продолжением адаптационного процесса. Доступ к квалифицированной психотерапевтической помощи должен быть открытым и доступным для всех студентов [57, 58].

Медицинское сопровождение. Обеспечение доступности медицинской помощи для иностранных студентов включает в себя множество моментов, способствующих их комфортному и безопасному пребыванию в новой стране. Особое внимание уделяется возможности общения со специалистами на родном языке, что позволяет избежать языковых барьеров и способствует лучшему пониманию медицинских вопросов. Кроме того, проведение профилактических медицинских осмотров, вакцинация и организация информационных кампаний о здоровом образе жизни являются важной частью обеспечения здоровья и успешной адаптации иностранных граждан [59].

Финансовая поддержка. Стипендии и гранты для иностранных студентов позволяют уменьшить их финансовую нагрузку и сосредоточиться на учебном процессе. Данные программы могут быть предназначены для привлечения талантливых студентов и создания разнообразной учебной среды. Помощь в поиске дополнительного заработка также может являться значительным элементом адаптации. Немаловажным фактором может выступать консультирование иностранных студентов по вопросам финансового планирования и управления

собственным бюджетом, что очень важно для граждан, которые могут столкнуться с непонятными / незнакомыми особенностями финансовой системы страны пребывания [5, 60].

Улучшение условий проживания. Адаптация иностранных студентов дополняется комфортными условиями проживания, что играет ключевую роль в их интеграции в учебный процесс, и может решить целый спектр сопутствующих вопросов. Обеспечение проживания в общежитиях включает в себя создание удобных и безопасных условий, которые способствуют социализации студентов. Общежития должны учитывать культурные особенности иностранных студентов и оборудоваться всем необходимым, включая общие зоны для отдыха и учебы, чтобы студенты могли легко общаться друг с другом и делиться опытом [61, 62].

Анализ имеющейся научной литературы показал, что обучение в российских вузах может создавать значительные риски для здоровья иностранных студентов. Для эффективной адаптации и профилактики заболеваний целесообразно применять комплексный подход, учитывающий академические, социокультурные, экономические и медико-экологические риски для здоровья иностранных студентов. Эффективность адаптационных программ напрямую связана с созданием благоприятных условий обучения и проживания, а также с обеспечением доступной и качественной медицинской помощи.

Результаты исследования расширяют представления о возможных факторах риска и проблемах адаптации иностранных студентов, позволяющих разрабатывать более эффективные стратегии для их решения. Они могут быть использованы для разработки новых и совершенствования имеющихся программ адаптации иностранных студентов в российских вузах, а также для подготовки методических рекомендаций для преподавателей, сотрудников международных отделов и других специалистов, работающих с иностранными студентами.

Ограничения и перспективы исследования. В настоящем обзоре литературы, несмотря на стремление к всестороннему анализу, имеются определенные ограничения, обусловленные выбранным дизайном исследования:

1. Субъективность отбора и интерпретации данных. В отличие от систематических обзоров и метаанализов, нарративный (описательный) обзор подразумевает большую степень субъективности при отборе и интерпретации данных.

2. Отсутствие количественной оценки. В данном обзоре выводы основаны на качественном анализе и обобщении существующих данных, а не на их статистическом анализе.

3. Ограниченный охват литературы. Несмотря на широкий поиск, обзор не претендует на полный охват всей существующей литературы по данной теме. Возможны пропуски исследований, которые не были включены в анализ из-за ограниченного доступа к базам данных или языкового барьера исследователей.

Учитывая эти ограничения, выводы, представленные в данном обзоре, следует рассматривать как структурированное обобщение существующих знаний о проблеме здоровья и адаптации иностранных студентов в российских вузах и как основу для дальнейших исследований. Необходимы более масштабные исследования, в том числе систематические обзоры и метаанализы, для получения более точных и обоснованных количественных данных.

Выводы. Результаты настоящего обзора литературы позволили проанализировать и систематизировать ключевые факторы риска для здоровья иностранных студентов, обучающихся в российских вузах. Выявлено, что внутривузовская среда оказывает комплексное воздействие на физическое и психическое благополучие данной категории обучающихся, обусловленное академическими, социокультурными, экономическими и медико-экологическими факторами. Высокая учебная нагрузка, языковой барьер, культурный шок, финансовые трудности, ограниченный доступ к медицинской помощи – лишь некоторые из факторов риска, с которыми сталкиваются иностранные студенты в процессе адаптации к новым условиям. Результаты анализа научной литературы показали, что воздействие данных факторов может приводить к повышенной заболеваемости, снижению академической успеваемости и социальной дезадаптации, что, в свою очередь, негативно сказывается на качестве жизни студентов и может препятствовать достижению поставленных образовательных целей. При этом систематизированы наиболее распространенные и действенные меры по адаптации иностранных студентов, позволяющие снизить воздействие факторов риска.

Данный обзор имеет практическую значимость для разработки и совершенствования программ адаптации иностранных студентов в российских вузах, а также для подготовки методических рекомендаций для преподавателей, сотрудников международных отделов и других специалистов, работающих с иностранными студентами. Полученные данные могут быть использованы для разработки целевых мероприятий, направленных на снижение негативного воздействия факторов риска на здоровье иностранных студентов, повышение эффективности их обучения. Необходима дальнейшая разработка и внедрение комплексных и эффективных программ адаптации, направленных на создание благоприятных условий для обучения, проживания и социальной интеграции иностранных студентов в российских вузах.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы статьи заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. International Encyclopedia of Education / ed. by R.J. Tierney, F. Rizvi, K. Ercikan. – Elsevier Science, 2023. – 4th ed. – P. 239–249.

2. Смоляков Д.А. О генезисе интернационализации высшего образования // Образование и наука. – 2019. – Т. 21, № 8. – С. 9–28. DOI: 10.17853/1994-5639-2019-8-9-28

3. Gümüş S., Gök E., Esen M. A Review of Research on International Student Mobility: Science Mapping the Existing Knowledge Base // Journal of Studies in International Education. – 2020. – Vol. 24, № 5. – P. 495–517. DOI: 10.1177/1028315319893651

4. Khanam S., Joshi R.M. International Student Mobility: Advancing the Internationalisation of Higher Education through a Systematic Review // Journal of Informatics Education and Research. – 2025. – Vol. 5, № 1. – P. 1957–1973. DOI: 10.52783/jier.v5i1.2185

5. Choudaha R. Three waves of international student mobility (1999–2020) // Studies in Higher Education. – 2017. – Vol. 42, № 5. – P. 825–832. DOI: 10.1080/03075079.2017.1293872

6. Чевжик Ю.В., Милушкина О.Ю. Адаптация студентов медицинских вузов к обучению // Методология и технология непрерывного профессионального образования. – 2023. – № 4. – С. 5–18. DOI: 10.24075/MTCPE.2023.016

7. Великанова Л.П. Психологические аспекты адаптации иностранных студентов к обучению в вузе // Актуальные проблемы обучения иностранных студентов в медицинском вузе: материалы научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию Астраханского ГМУ / под ред. А.Х. Сатретдиновой. – 2018. – С. 16–20.

8. Лялюк А.В., Тучина О.Р. Исследование факторов риска образовательной среды современного вуза: позиции студентов // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 3: Педагогика и психология. – 2018. – № 3 (223). – С. 57–65.

9. Иванова И.В., Щербакова А.О., Сорокина А.С. Проблемы адаптации студентов к новой образовательной и социокультурной среде // Достижения вузовской науки 2018: сборник статей международного научно-практического конкурса: в 3 ч. – 2018. – Ч. 3. – С. 23–25.

10. Беликова Р.М., Пятунина О.И. Проблема адаптации студентов к обучению в вузе // Ученые записки Забайкальского государственного университета. Серия: Биологические науки. – 2009. – № 1 (24). – С. 129–130.

11. Насонова Н.А., Ильичева В.Н., Соколов Д.А. Сложности адаптации иностранных студентов первого курса обучения в медицинском вузе // Современные тенденции развития системы образования: сборник статей. – 2019. – С. 315–317.

12. Роль латинского языка в медицинской терминологии / Н.Т. Алексеева, С.В. Клочкова, Д.Б. Никитюк, А.Г. Кварацхелия // Инновационные обучающие технологии в медицине: сборник материалов республиканской научно-практической конференции с международным участием. – 2017. – С. 553–556.

13. Иностранные студенты на Северном Кавказе: региональные различия и проблемы адаптации (на примере Северо-Кавказского федерального университета) / В.С. Белозеров, Н.А. Щитова, В.В. Чихичин, И.А. Соловьев // Наука. Инновации. Технологии. – 2017. – № 4. – С. 79–92.

14. Othman I.W., Abd Rahim S., Bakar A.L. The Factors Contributing to The Different Self-Sufficiency Adaptation and Academic Performance the Case of International Students at Malaysian Public Universities // International Journal of Education Psychology and Counseling. – 2022. – Vol. 7, № 47. – P. 750–772. DOI: 10.35631/IJEPC.747056

15. Состояние тревожности и мотивация к учебной деятельности иностранных и российских студентов в медицинском ВУЗе / И.В. Старикова, Т.Н. Радышевская, Е.М. Чаплиева, М.В. Журавлева, Е.С. Александрина // Научное обозрение. Педагогические науки. – 2018. – № 3. – С. 58–61.

16. Susilawati S., Zuhro N. Cultural Adaptation and Social Experience of International Students at UIN Maulana Malik Ibrahim Malang // Education Quarterly Reviews. – 2022. – Vol. 5, № 3. – P. 134–141. DOI: 10.31014/aior.1993.05.03.531

17. Peng R.-Z., Wu W.-P. Measuring communication patterns and intercultural transformation of international students in cross-cultural adaptation // International Journal of Intercultural Relations. – 2019. – Vol. 70. – P. 78–88. DOI: 10.1016/j.ijintrel.2019.03.004

18. Гаджиев А.А., Боброва О.Е. Адаптация и социализация иностранных студентов в российских университетах // Синергия Наук. – 2019. – № 33. – С. 639–651.

19. Васильева С.В. Адаптация студентов к вузам с различными условиями обучения // Психолого-педагогические проблемы развития личности в современных условиях: психология и педагогика в общественной практике: сборник научных трудов. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2000. – С. 84–93.

20. Bahri S.S., Hum M., Wardani Sitorus W. An Analysis cultural shock of education system by Indonesian students in Singapore: Analisis gegar budaya sistem pendidikan pelajar Indonesia di Singapura // JURNAL RISET RUMPUN ILMU BAHASA. – 2022. – Vol. 1, № 2. – P. 01–13. DOI: 10.55606/jurribah.v1i2.121

21. Hrehova D., Žiaran P., Seňová A. Learning and growing in a foreign context: Review of literature on cross-cultural adaptation of international students // SHS Web of Conferences. – 2021. – Vol. 129, № 27. – P. 10005. DOI: 10.1051/shsconf/202112910005

22. Абунавас Х.А., Берестнева О.Г. Исследование проблем адаптации иностранных студентов на примере Томского политехнического университета // Методология обучения и повышение эффективности академической, социально-культурной и психологической адаптации иностранных студентов в российском вузе: теоретические и прикладные аспекты: материалы всероссийского семинара. – 2008. – Т. 2. – С. 7–12.

23. Щека Н.Ю., Кальницкая Я.В. Социальная адаптация иностранных студентов в вузах во второй половине XX – конце XX вв.: практико-ориентировочный анализ // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Гуманитарные науки. – 2019. – № 84. – С. 45–49.

24. Homesickness and Socio-Cultural Adaptation towards Perceived Stress among International Students of a Public University in Sabah: An Exploration Study for Social Sustainability / B. Rathakrishnan, S.S.B. Singh, M.R. Kamaluddin, M.F. Ghazali, A. Yahaya, N.H. Mohamed, A.R. Krishnan // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, № 9. – P. 4924. DOI: 10.3390/su13094924

25. Руженкова В.В. Учебный стресс как фактор риска формирования аддитивного поведения, тревожных и депрессивных расстройств у иностранных студентов медиков // Научный результат. Медицина и фармация. – 2018. – Т. 4, № 2. – С. 55–68. DOI: 10.18413/2313-8955-2018-4-2-0-6

26. Adverse mental health outcomes in medical students in Serbia during the COVID-19 pandemic / D.I. Ristic, D. Hinić, I. Ristić, P. Milanović, N. Milenković, D. Selaković, G. Rosić // Acta Clin. Croat. – 2024. – Vol. 63, № 1. – P. 73–79. DOI: 10.20471/acc.2024.63.01.9

27. Erturk S., Nguyen Luu L.A. Adaptation of Turkish international students in Hungary and the United States: A comparative case study // International Journal of Intercultural Relations. – 2022. – Vol. 86, № 2. – P. 1–13. DOI: 10.1016/j.ijintrel.2021.10.006

28. Айснер Л.Ю., Трашкова С.М. Особенности адаптации иностранных студентов (на примере обучающихся ФГБОУ ВО Красноярский государственный аграрный университет) // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. – 2017. – № 7 (25). – С. 12–17.

29. Schmitt M.T., Spears R., Branscombe N.R. Constructing a minority group identity out of shared rejection: The case of international students // European Journal of Social Psychology. – 2003. – Vol. 33, № 1. – P. 1–12. DOI: 10.1002/ejsp.131

30. Psychological and sociocultural adaptation of medical university international students in Armenia / L.S. Sahakyan, N.S. Mkrthchyan, A.N. Patel, R.R. Rather Mohd, D.S. Barapatre, A.V. Saharyan, A.L. Shaljyan, A.G. Antonyan // GSC Advanced Research and Reviews. – 2022. – Vol. 13, № 02. – P. 269–276. DOI: 10.30574/gscarr.2022.13.2.0304

31. Морозова Ю.В. К вопросу об адаптации иностранных студентов в многонациональмом вузе: региональные аспекты // Азимут научных исследований: педагогика и психология. – 2018. – Т. 7, № 1 (22). – С. 129–132.

32. Анфалова Л.В. Проблемы межкультурной адаптации иностранных студентов в образовательной организации // Теория и методика обучения и воспитания в современном образовательном пространстве: сборник материалов IV Международной научно-практической конференции. – 2018. – С. 145–152.

33. Винокурова Е.И. Управление социально-экономической адаптацией и интеграцией внешних мигрантов в российский социум // Вопросы управления. – 2016. – № 1 (38). – С. 28–34.

34. Güneş M., Aydar Ö. Being Student in a Foreign Country: Adaptation Problems and Solution Strategies // Sakarya University Journal of Education. – 2019. – Vol. 9, № 2. – P. 363–382. DOI: 10.19126/suje.544761

35. Панченко Л.С. К проблеме питания иностранных студентов в период адаптации к резко континентальному климату Волгограда // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2024. – № 4. – С. 5–9. DOI: 10.17513/mjpfi.13619

36. Сычёва Е.А., Толмачёв Д.А. Характеристика питания студентов медицинского вуза // Modern science. – 2019. – № 12–4. – С. 174–177.

37. Psychophysiological Adaptation of International Students to Learning Abroad / L. Holubnycha, L. Matsapura, L. Miroshnik, I. Hetmanets // International Journal of Innovative Research and Scientific Studies. – 2022. – Vol. 5, № 1. – P. 37–46. DOI: 10.53894/ijirss.v5i1.359

38. Udah H., Francis A. Vulnerability and Well-Being: International Students' Experience in North Queensland, Australia // Journal of Comparative & International Higher Education. – 2022. – Vol. 14, № 5. – P. 171–196. DOI: 10.32674/jcihe.v14i5.3942

39. Socioeconomic and academic consequences of COVID-19 pandemic on medical students from the University of Rwanda / O.N.U. Ndamukunda, M.T. Mutuyimana, F. Umubano, E. Tuyishime // PLoS One. – 2025. – Vol. 20, № 2. – P. e0318066. DOI: 10.1371/journal.pone.0318066

40. Irawan A.W., Dwisona D., Lestari M. Psychological Impacts of Students on Online Learning During the Pandemic COVID-19 // KONSELI: Jurnal Bimbingan dan Konseling (E-Journal). – 2020. – Vol. 7, № 1. – P. 53–60. DOI: 10.24042/kons.v7i1.6389

41. Руслякова Е.Е., Голубь А.А., Киселева Ю.П. Особенности нервно-психического напряжения у современных студентов в условиях вынужденной самоизоляции // Мир науки. Педагогика и психология. – 2020. – Т. 8, № 3. – С. 69.

42. Psychological Capital, Well-being, and Distress of International Students / P.R. Prasath, Y. Xiong, Q. Zhang, L. Jeon // Int. J. Adv. Couns. – 2022. – Vol. 44, № 3. – P. 529–549. DOI: 10.1007/s10447-022-09473-1

43. Руженкова В.В., Хамская И.С., Гомеляк Ю.Н. Депрессия у студентов медицинского вуза: распространенность, динамика и коморбидность // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. – 2022. – Т. 122, № 6–2. – С. 7–11. DOI: 10.17116/jnevro20221220627

44. Чербиева С.В. Особенности влияния учебного стресса на студенческую жизнь обучающихся разных курсов // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. – 2022. – № 4 (206). – С. 607–615. DOI: 10.34835/issn.2308-1961.2022.4.p607-615

45. A research of the psycho-emotional state of a teacher under the influence of social changes / A.V. Kandaurova, N.N. Surtaeva, V.V. Afanasiev, O.A. Ivanova, R.G. Rezakov // ESPACIOS. – 2018. – Vol. 39. № 46. – P. 19.

46. The role of natural light in circadian blood pressure rhythm and desynchronosis in the Arctic / N.P. Shurkevich, A.S. Vetoshkin, L.I. Gapon, D.G. Gubin // European Heart Journal. – 2018. – Vol. 39, Suppl. 1. – P. 1407. DOI: 10.1093/eurheartj/ehy566.P6578

47. Examination of factors associated with physical activity among medical students pre and post-COVID-19 in Serbia / K. Stratakis, J. Todorovic, M. Mirkovic, D. Nešić, T. Tesanovic, Z. Terzić-Šupić // Sci. Rep. – 2025. – Vol. 15, № 1. – P. 5791. DOI: 10.1038/s41598-025-90544-9

48. COVID-19 Pandemic and International Students' Mental Health in China: Age, Gender, Chronic Health Condition and Having Infected Relative as Risk Factors / C.O. Antwi, M.A. Belle, S.Y. Ntim, Y. Wu, E. Affum-Osei, M.O. Aboagye, J. Ren // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2022. – Vol. 19, № 13. – P. 7916. DOI: 10.3390/ijerph19137916

49. Анализ распространенности миопии среди студентов медицинского вуза / Д.Ю. Плотников, С.Т. Аглиуллина, Л.Ш. Ашрятова, С.А. Панкратова, К.А. Лушанина, И.К. Закиров, А.В. Шулаев // Медицина. – 2023. – Т. 11, № 1. – С. 25–34. DOI: 10.29234/2308-9113-2023-11-1-25-34

50. Arde B.O.A. Jr, Claudio E.A. Health behaviors and protective factors of international students in the university of northern Philippines // Surabaya Internasional Health Conference 2019. – 2019. – Vol. 1, № 1. – P. 56–74.

51. Food consumption associated with depression, anxiety and stress in students entering a public university / M.E. Ribeiro José, I.E. Costa Ramos, T.M. de Sousa, D.S. Canella // J. Nutr. Sci. – 2025. – Vol. 14. – P. e3. DOI: 10.1017/jns.2024.90

52. Human gut microbiota composition associated with international travels / D. Henares, V. Monsalvez, P. Brotons, M.L. Machado, S. Capilla, A. Gomila-Grange, P. Bierge, M. Cubero [et al.] // Travel Med. Infect. Dis. – 2024. – Vol. 61. – P. 102747. DOI: 10.1016/j.tmaid.2024.102747

53. Гасанов Р.Ф., Кобзарь В.Н., Журавлева А.Д. Уровень информированности студентов и интернет-пользователей о паразитарных заболеваниях // Бюллетень науки и практики. – 2020. – Т. 6, № 7. – С. 218–225. DOI: 10.33619/2414-2948/56/22

54. Adaptation of International Students to University Reality in Kazakhstan (on the Example of WKMU) / J.K. Gahwal, A. Urkunova, G. Kuzembayeva, A. Kupenova, G. Nurgaliyeva // Journal of Humanities and Social Sciences Studies. – 2021. – Vol. 3, № 5. – P. 31–35. DOI: 10.32996/jhsss.2021.3.5.4

55. Luo M., Zhang X. Research Status about Influence Factors of International Students' Cross-Cultural Adaptation with Different Models // Open Journal of Social Sciences. – 2021. – Vol. 09, № 06. – P. 51–63. DOI: 10.4236/jss.2021.96006

56. Этнокультурные особенности академической адаптации студентов дальнего и ближнего зарубежья / Т.В. Черникова, Е.А. Сокальский, В.В. Болучевская, О.И. Шутова // Научно-педагогическое обозрение. Pedagogical Review. – 2021. – Т. 6, № 40. – С. 178–189. DOI: 10.23951/2307-6127-2021-6-178-189

57. Mental health conditions of Chinese international students and associated predictors amidst the pandemic / L. Yu, Y. Cao, Y. Wang, T. Liu, A. MacDonald, F. Bian, X. Li, X. Wang [et al.] // J. Migr. Health. – 2023. – Vol. 7. – P. 100185. DOI: 10.1016/j.jmh.2023.100185

58. Maharaj R., Ndwiga D., Chutiyami M. Mental health and wellbeing of international students in Australia: a systematic review // J. Ment. Health. – 2024. – P. 1–19. DOI: 10.1080/09638237.2024.2390393

59. Коваль Е.Д. Теоретические аспекты исследования процесса адаптации иностранных студентов к социокультурной и образовательной среде высшей школы России // Ученые записки университета имени П.Ф. Лесгафта. – 2017. – № 10 (152). – С. 110–115.

60. Barsegyan V., Maas I. First-generation students' educational outcomes: the role of parental educational, cultural, and economic capital – a 9-years panel study // Research in Social Stratification and Mobility. – 2024. – Vol. 91. – P. 100939. DOI: 10.1016/j.rssm.2024.100939

61. Максимчук Е.Д. Применение программы социально-психологического сопровождения межкультурной адаптации иностранных студентов // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2016. – № 4. – С. 171–175. DOI: 10.21603/2078-8975-2016-4-171-175

62. International students' perspectives on factors impacting psychological well-being and early help-seeking behaviours in undergraduate nursing programs / A. Abdelkader, B. Joseph, L. Anish, M. Kaur, S. Bourke, C. Hayes, M. Thong, V. Plummer, S. Jacob // Nurs. Open. – 2024. – Vol. 11, № 9. – P. e70030. DOI: 10.1002/nop2.70030

Кириченко Л.В., Киланова М.В., Глухих М.В. Факторы и стратегии снижения риска здоровью иностранных студентов при обучении в российских вузах // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 2. – С. 73–86. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.06

UDC 613; 614
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.06.eng

Read online

Review

FACTORS AND STRATEGIES FOR REDUCING HEALTH RISKS FOR FOREIGN STUDENTS ATTENDING RUSSIAN UNIVERSITIES

L.V. Kirichenko[1], M.V. Kilanova[1], M.V. Glukhikh[1,2]

[1]Perm State Medical University named after Academician E.A. Wagner, 26 Petropavlovskaya St., Perm, 614000, Russian Federation
[2]Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, 82 Monastyrskaya St., Perm, 614045, Russian Federation

At present, investigating influence exerted by factors of the intra-university environment on foreign students' health is a relevant research trend. The aim of this study was to summarize and analyze literary data devoted to investigating health risk factors for foreign students associated with studying at Russian universities, analyzing adaptation strategies aimed at improving physical and mental well-being of foreign citizens and increasing effectiveness of their education.

The study was designed as a descriptive review, which implied qualitative description of scientific literature selected per established keywords. Overall, we analyzed 325 articles; of them, 62 were covered by the present review.

The article outlines certain challenges that foreign students may face during their studies at a higher educational institution. Modern higher education is characterized by academic mobility. The number of foreign students in higher education institutions ranges between 10 and 40 %. Foreign students who come from countries with different geoclimatic and cultural traditions have to go through a long adaptation period.

The intra-university environment was revealed to include a complex of multifaceted factors, namely, educational space, social sphere, physical, technological, financial and psychological aspects. Each factor contributed not only to academic success of foreign students, but also to their personal development and integration into the society.

Success of the educational process for foreign citizens was established to depend on education conditions, time and quality of their adaptation period as well as professional competence of teaching staff.

In addition, health of international students was proven to be an important aspect that included physical, psychological and social well-being. Being influenced by the intra-university environment, students may be susceptible to diseases of the nervous and musculoskeletal systems, respiratory organs, eyes and their adnexa, gastrointestinal tract, as well as parasitic diseases.

Based on the analyzed Russian and foreign works, we can conclude that the intra-university environment a health risk factor for foreign students

Keywords: *foreign students, risk factors, health, adaptation, intra-university environment, higher education, student mobility.*

References

1. International Encyclopedia of Education, 4th ed. In: R.J. Tierney, F. Rizvi, K. Ercikan eds. Elsevier Science, 2023, pp. 239–249.

2. Smaliakou D.A. The Genesis of Higher Education Internationalisation. *Obrazovanie i nauka*, 2019, vol. 21, no. 8, pp. 9–28. DOI: 10.17853/1994-5639-2019-8-9-28 (in Russian).

3. Gümüş S., Gök E., Esen M. A Review of Research on International Student Mobility: Science Mapping the Existing Knowledge Base. *Journal of Studies in International Education*, 2020, vol. 24, no. 5, pp. 495–517. DOI: 10.1177/1028315319893651

4. Khanam S., Joshi R.M. International Student Mobility: Advancing the Internationalisation of Higher Education through a Systematic Review. *Journal of Informatics Education and Research*, 2025, vol. 5, no. 1, pp. 1957–1973. DOI: 10.52783/jier.v5i1.2185

© Kirichenko L.V., Kilanova M.V., Glukhikh M.V., 2025

Larisa V. Kirichenko – Doctor of Medical Sciences, Head of the Department of Common Hygiene and Specialized Hygiene Disciplines (e-mail: lkv-7@yandex.ru; tel.: +7 (342) 212-10-07; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6306-1757).

Mariya V. Kilanova – lecturer at the Department of Common Hygiene and Specialized Hygiene Disciplines (e-mail: marya.kilanova@yandex.ru; tel.: +7 (342) 212-09-13; ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3182-0867).

Maxim V. Glukhikh – Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher at the Department for Systemic Procedures of Sanitary-Hygienic Analysis and Monitoring (e-mail: gluhih@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-18-04; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4755-8306).

5. Choudaha R. Three waves of international student mobility (1999–2020). *Studies in Higher Education*, 2017, vol. 42, no. 5, pp. 825–832. DOI: 10.1080/03075079.2017.1293872

6. Chevzhik Yu.V., Milushkina O.Yu. Adaptation of medical students to learning. *Metodologiya i tekhnologiya nepreryvnogo professional'nogo obrazovaniya*, 2023, no. 4, pp. 5–18. DOI: 10.24075/MTCPE.2023.016 (in Russian).

7. Velikanova L.P. Psychological aspects of adaptation of foreign students to study at the university. *Aktual'nye problemy obucheniya inostrannykh studentov v meditsinskom vuze: Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 100-letiyu Astrakhanskogo GMU*, 2018. In: A.Kh. Satretdinova ed. pp. 16–19 (in Russian).

8. Lyalyuk A.V., Tuchina O.R. Investigation of risk factors of the educational environment of modern higher education institution: students' positions. *Vestnik Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 3: Pedagogika i psikhologiya*, 2018, no. 3 (223), pp. 57–65 (in Russian).

9. Ivanova I.V., Shcherbakova A.O., Sorokina A.S. Problems of adaptation of students to a new educational and socio-cultural environment. *Dostizheniya vuzovskoi nauki 2018: sbornik statei Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo konkursa: in 3 parts*, 2018, pt 3, pp. 23–25 (in Russian).

10. Belikova R.M., Pyatunina O.I. Problems of students' adaptation to studying in a higher educational institution. *Uchenye zapiski Zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologicheskie nauki*, 2009, no. 1 (24), pp. 129–130 (in Russian).

11. Nasonova N.A., Il'icheva V.N., Sokolov D.A. Slozhnosti adaptatsii inostrannykh studentov pervogo kursa obucheniya v meditsinskom vuze [Difficulties in Adaptation of First-Year Foreign Students at a Medical University]. *Sovremennye tendentsii razvitiya sistemy obrazovaniya: sbornik statei*, 2019, pp. 315–317 (in Russian).

12. Alekseeva N.T., Klochkova S.V., Nikityuk D.B., Kvaratskheliya A.G. Rol' latinskogo yazyka v meditsinskoi terminologii [The Role of Latin in Medical Terminology]. *Innovatsionnye obuchayushchie tekhnologii v meditsine: sbornik materialov Respublikanskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*, 2017, pp. 553–556 (in Russian).

13. Belozerov V.S., Shchitova N.A., Chikhichin V.V., Soloviev I.A. Foreign students in the North Caucasus: regional differences and problems of adaptation (on the example of the North Caucasus Federal University). *Nauka. Innovatsii. Tekhnologii*, 2017, no. 4, pp. 79–92 (in Russian).

14. Othman I.W., Abd Rahim S., Bakar A.L. The Factors Contributing to The Different Self-Sufficiency Adaptation and Academic Performance the Case of International Students at Malaysian Public Universities. *International Journal of Education Psychology and Counseling*, 2022, vol. 7, no. 47, pp. 750–772. DOI: 10.35631/IJEPC.747056

15. Starikova I.V., Radyshevskaya T.N., Chaplieva E.M., Zhuravleva M.V., Alexandrina E.S. State of alert and motivation for educational activity of foreign and Russian students in the medical university. *Nauchnoe obozrenie. Pedagogicheskie nauki*, 2018, no. 3, pp. 58–61 (in Russian).

16. Susilawati S., Zuhro N. Cultural Adaptation and Social Experience of International Students at UIN Maulana Malik Ibrahim Malang. *Education Quarterly Reviews*, 2022, vol. 5, no. 3, pp. 134–141. DOI: 10.31014/aior.1993.05.03.531

17. Peng R.-Z., Wu W.-P. Measuring communication patterns and intercultural transformation of international students in cross-cultural adaptation. *International Journal of Intercultural Relations*, 2019, vol. 70, pp. 78–88. DOI: 10.1016/j.ijintrel.2019.03.004

18. Gadzhiev A.A., Bobrova O.E. Adaptatsiya i sotsializatsiya inostrannykh studentov v rossiiskikh universitetakh [Adaptation and socialization of foreign students in Russian universities]. *Sinergiya Nauk*, 2019, no. 33, pp. 639–651 (in Russian).

19. Vasil'eva S.V. Adaptatsiya studentov k vuzam s razlichnymi usloviyami obucheniya [Adaptation of students to universities with different educational conditions]. *Psikhologo-pedagogicheskie problemy razvitiya lichnosti v sovremennykh usloviyakh: psikhologiya i pedagogika v obshchestvennoi praktike: Sbornik nauchnykh trudov*. Saint Petersburg, RGPU im. A.I. Gertsena Publ., 2000, pp. 84–93 (in Russian).

20. Bahri S.S., Hum M., Wardani Sitorus W. An Analysis cultural shock of education system by Indonesian students in Singapore: Analisis gegar budaya sistem pendidikan pelajar Indonesia di Singapura. *JURNAL RISET RUMPUN ILMU BAHASA*, 2022, vol. 1, no. 2, pp. 01–13. DOI: 10.55606/jurribah.v1i2.121

21. Hrehova D., Žiaran P., Seňová A. Learning and growing in a foreign context: Review of literature on cross-cultural adaptation of international students. *SHS Web of Conferences*, 2021, vol. 129, no. 27, pp. 10005. DOI: 10.1051/shsconf/202112910005

22. Abunavas Kh.A., Berestneva O.G. Issledovanie problem adaptatsii inostrannykh studentov na primere Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Research on problems of adaptation of foreign students on the example of Tomsk Polytechnic University]. *Metodologiya obucheniya i povyshenie effektivnosti akademicheskoi, sotsial'no-kul'turnoi i psikhologicheskoi adaptatsii inostrannykh studentov v rossiiskom vuze: teoreticheskie i prikladnye aspekty: materialy vserossiiskogo seminara*, 2008, vol. 2, pp. 7–12 (in Russian).

23. Shcheka N.Yu., Kal'nitskaya Ya.V. Social adaptation of foreign students in universities in the second half of the XX – the end of the XX century: practice-oriented analysis. *Vestnik AmGU*, 2019, no. 84, pp. 45–49 (in Russian).

24. Rathakrishnan B., Singh S.S.B., Kamaluddin M.R., Ghazali M.F., Yahaya A., Mohamed N.H., Krishnan A.R. Homesickness and Socio-Cultural Adaptation towards Perceived Stress among International Students of a Public University in Sabah: An Exploration Study for Social Sustainability. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 9, pp. 4924. DOI: 10.3390/su13094924

25. Ruzhenkova V.V. Educational stress as a factor of the risk of formation of additive behavior, alert and depressive disorders in foreign medical students. *Nauchnyi rezul'tat. Meditsina i farmatsiya*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 55–68. DOI: 10.18413/2313-8955-2018-4-2-0-6 (in Russian).

26. Ristic D.I., Hinić D., Ristić I., Milanović P., Milenković N., Selaković D., Rosić G. Adverse mental health outcomes in medical students in Serbia during the COVID-19 pandemic. *Acta Clin. Croat.*, 2024, vol. 63, no. 1, pp. 73–79. DOI: 10.20471/acc.2024.63.01.9

27. Erturk S., Nguyen Luu L.A. Adaptation of Turkish international students in Hungary and the United States: A comparative case study. *International Journal of Intercultural Relations*, 2022, vol. 86, no. 2, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.ijintrel.2021.10.006

28. Aisner L.Yu., Trashkova S.M. Features of adaptation of foreign students (on the example of studying FGBOU in the Krasnoyarsk State Agrarian University). *Innovatsionnaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya*, 2017, no. 7 (25), pp. 12–17 (in Russian).

29. Schmitt M.T., Spears R., Branscombe N.R. Constructing a minority group identity out of shared rejection: The case of international students. *European Journal of Social Psychology*, 2003, vol. 33, no. 1, pp. 1–12. DOI: 10.1002/ejsp.131

30. Sahakyan L.S., Mkrthchyan N.S., Patel A.N., Rather Mohd R.R., Barapatre D.S., Saharyan A.V., Shaljyan A.L., Antonyan A.G. Psychological and sociocultural adaptation of medical university international students in Armenia. *GSC Advanced Research and Reviews*, 2022, vol. 13, no. 02, pp. 269–276. DOI: 10.30574/gscarr.2022.13.2.0304

31. Morozova Yu.V. On the issue of foreign student adaptation in multinational higher school: the regional aspects. *Azimut nauchnykh issledovanii: pedagogika i psikhologiya*, 2018, vol. 7, no. 1 (22), pp. 129–132 (in Russian).

32. Anfalova L.V. Problemy mezhkul'turnoi adaptatsii inostrannykh studentov v obrazovatel'noi organizatsii [Problems of intercultural adaptation of foreign students in an educational organization]. *Teoriya i metodika obucheniya i vospitaniya v sovremennom obrazovatel'nom prostranstve: Sbornik materialov IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 2018, pp. 145–152 (in Russian).

33. Vinokurova E.I. Management of socio-economic adaptation and integration of external migrants in the Russian society. *Voprosy upravleniya*, 2016, no. 1 (38), pp. 28–34 (in Russian).

34. Güneş M., Aydar Ö. Being Student in a Foreign Country: Adaptation Problems and Solution Strategies. *Sakarya University Journal of Education*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 363–382. DOI: 10.19126/suje.544761

35. Panchenko L.S. To the problem of nutrition of foreign students during the period of adaptation to the sharply continental climate of Volgograd. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanii*, 2024, no. 4, pp. 5–9. DOI: 10.17513/mjpfi.13619 (in Russian).

36. Sycheva E.A., Tolmachev D.A. Kharakteristika pitaniya studentov meditsinskogo vuza [Characteristics of nutrition of medical university students]. *Modern science*, 2019, no. 12–4, pp. 174–177 (in Russian).

37. Holubnycha L., Matsapura L., Miroshnik L., Hetmanets I. Psychophysiological Adaptation of International Students to Learning Abroad. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 2022, vol. 5, no. 1, pp. 37–46. DOI: 10.53894/ijirss.v5i1.359

38. Udah H., Francis A. Vulnerability and Well-Being: International Students' Experience in North Queensland, Australia. *Journal of Comparative & International Higher Education*, 2022, vol. 14, no. 5, pp. 171–196. DOI: 10.32674/jcihe.v14i5.3942

39. Ndamukunda O.N.U., Mutuyimana M.T., Umubano F., Tuyishime E. Socioeconomic and academic consequences of COVID-19 pandemic on medical students from the University of Rwanda. *PLoS One*, 2025, vol. 20, no. 2, pp. e0318066. DOI: 10.1371/journal.pone.0318066

40. Irawan A.W., Dwisona D., Lestari M. Psychological Impacts of Students on Online Learning During the Pandemic COVID-19. *KONSELI: Jurnal Bimbingan dan Konseling (E-Journal)*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 53–60. DOI: 10.24042/kons.v7i1.6389

41. Ruslyakova E.E., Golub' A.A., Kiseleva U.P. Features of neuropsychic stress in modern students in conditions of forced self-isolation. *Mir nauki. Pedagogika i psikhologiya*, 2020, vol. 8, no. 3, pp. 69 (in Russian).

42. Prasath P.R., Xiong Y., Zhang Q., Jeon L. Psychological Capital, Well-being, and Distress of International Students. *Int. J. Adv. Couns.*, 2022, vol. 44, no. 3, pp. 529–549. DOI: 10.1007/s10447-022-09473-1

43. Ruzhenkova V.V., Khamskaya I.S., Gomelak Yu.N. Depression in medical students: prevalence, dynamics and comorbidity. *Zhurnal nevrologii i psikhiatrii im. S.S. Korsakova*, 2022, vol. 122, no. 6–2, pp. 7–11. DOI: 10.17116/jnevro20221220627 (in Russian).

44. Cherbieva S.V. Features of the influence of educational stress on the student life of students of different courses. *Uchenye zapiski universiteta im. P.F. Lesgafta*, 2022, no. 4 (206), pp. 607–615. DOI: 10.34835/issn.2308-1961.2022.4.p607-615 (in Russian).

45. Kandaurova A.V., Surtaeva N.N., Afanasiev V.V., Ivanova O.A., Rezakov R.G. A research of the psycho-emotional state of a teacher under the influence of social changes. *ESPACIOS*, 2018, vol. 39, no. 46, pp. 19.

46. Shurkevich N.P., Vetoshkin A.S., Gapon L.I., Gubin D.G. The role of natural light in circadian blood pressure rhythm and desynchronosis in the Arctic. *European Heart Journal*, 2018, vol. 39, suppl. 1, pp. 1407. DOI: 10.1093/eurheartj/ehy566.P6578

47. Stratakis K., Todorovic J., Mirkovic M., Nešić D., Tesanovic T., Terzić-Šupić Z. Examination of factors associated with physical activity among medical students pre and post-COVID-19 in Serbia. *Sci. Rep.*, 2025, vol. 15, no. 1, pp. 5791. DOI: 10.1038/s41598-025-90544-9

48. Antwi C.O., Belle M.A., Ntim S.Y., Wu Y., Affum-Osei E., Aboagye M.O., Ren J. COVID-19 Pandemic and International Students' Mental Health in China: Age, Gender, Chronic Health Condition and Having Infected Relative as Risk Factors. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2022, vol. 19, no. 13, pp. 7916. DOI: 10.3390/ijerph19137916

49. Plotnikov D.Yu., Agliullina S.T., Ashryatova L.Sh., Pankratova S.A., Lushanina K.A., Zakirov I.K., Shulaev A.V. Analysis of the Prevalence of Myopia in Medical Students. *Meditsina*, 2023, vol. 11, no. 1, pp. 25–34. DOI: 10.29234/2308-9113-2023-11-1-25-34 (in Russian).

50. Arde B.O.A. Jr, Claudio E.A. Health behaviors and protective factors of international students in the university of northern Philippines. *Surabaya Internasional Health Conference 2019*, 2019, vol. 1, no. 1, pp. 56–74.

51. Ribeiro José M.E., Costa Ramos I.E., de Sousa T.M., Canella D.S. Food consumption associated with depression, anxiety and stress in students entering a public university. *J. Nutr. Sci.*, 2025, vol. 14, pp. e3. DOI: 10.1017/jns.2024.90

52. Henares D., Monsalvez V., Brotons P., Machado M.L., Capilla S., Gomila-Grange A., Bierge P., Cubero M. [et al.]. Human gut microbiota composition associated with international travels. *Travel Med. Infect. Dis.*, 2024, vol. 61, pp. 102747. DOI: 10.1016/j.tmaid.2024.102747

53. Gasanov R., Kobzar V., Zhuravleva A. Student information level and users internet about parasitic diseases. *Byulleten' nauki i praktiki*, 2020, vol. 6, no. 7, pp. 218–225. DOI: 10.33619/2414-2948/56/22 (in Russian).

54. Gahwal J.K., Urkunova A., Kuzembayeva G., Kupenova A., Nurgaliyeva G. Adaptation of International Students to University Reality in Kazakhstan (on the Example of WKMU). *Journal of Humanities and Social Sciences Studies*, 2021, vol. 3, no. 5, pp. 31–35. DOI: 10.32996/jhsss.2021.3.5.4

55. Luo M., Zhang X. Research Status about Influence Factors of International Students' Cross-Cultural Adaptation with Different Models. *Open Journal of Social Sciences*, 2021, vol. 09, no. 06, pp. 51–63. DOI: 10.4236/jss.2021.96006

56. Chernikova T.V., Sokal'skiy E.A., Boluchevskaya V.V., Shutova O.I. Ethnocultural features of academic adaptation of students of the near and far abroad. *Nauchno-pedagogicheskoe obozrenie. Pedagogical Review*, 2021, vol. 6, no. 40, pp. 178–189. DOI: 10.23951/2307-6127-2021-6-178-189 (in Russian).

57. Yu L., Cao Y., Wang Y., Liu T., MacDonald A., Bian F., Li X., Wang X. [et al.]. Mental health conditions of Chinese international students and associated predictors amidst the pandemic. *J. Migr. Health*, 2023, vol. 7, pp. 100185. DOI: 10.1016/j.jmh.2023.100185

58. Maharaj R., Ndwiga D., Chutiyami M. Mental health and wellbeing of international students in Australia: a systematic review. *J. Ment. Health*, 2024, pp. 1–19. DOI: 10.1080/09638237.2024.2390393

59. Koval E.D. Theoretical aspects of investigation of process of foreign students' adaptation in socio-cultural end educational environment of Russian higher school. *Uchenye zapiski universiteta imeni P.F. Lesgafta*, 2017, no. 10 (152), pp. 110–115 (in Russian).

60. Barsegyan V., Maas I. First-generation students' educational outcomes: the role of parental educational, cultural, and economic capital – a 9-years panel study. *Research in Social Stratification and Mobility*, 2024, vol. 91, pp. 100939. DOI: 10.1016/j.rssm.2024.100939

61. Maksimchuk E.D. The application of social and psychological support of intercultural adaptation of foreign students. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, no. 4, pp. 171–175. DOI: 10.21603/2078-8975-2016-4-171-175 (in Russian).

62. Abdelkader A., Joseph B., Anish L., Kaur M., Bourke S., Hayes C., Thong M., Plummer V., Jacob S. International students' perspectives on factors impacting psychological well-being and early help-seeking behaviours in undergraduate nursing programs. *Nurs. Open*, 2024, vol. 11, no. 9, pp. e70030. DOI: 10.1002/nop2.70030

Kirichenko L.V., Kilanova M.V., Glukhikh M.V. Factors and strategies for reducing health risks for foreign students attending Russian universities. Health Risk Analysis, 2025, no. 2, pp. 73–86. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.06.eng

Получена: 06.05.2025
Одобрена: 17.06.2025
Принята к публикации: 26.06.2025

ОЦЕНКА РИСКА В ЭПИДЕМИОЛОГИИ

УДК 628.1.033: 578.8 (470+571)
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.07

Читать онлайн

Научная статья

КОНТАМИНАЦИЯ ВИРУСАМИ ВОДЫ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ КАК ФАКТОР РИСКА ЗДОРОВЬЮ: ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Г.М. Трухина[1], Г.Г. Бадамшина[2,3], Е.А. Попцова[4], М.А. Ярославцева[5], Е.С. Волостнова[2], Э.Р. Гузаирова[6]

[1]Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана, Российская Федерация, 141014, Московская область, городской округ Мытищи, г. Мытищи, ул. Семашко, 2
[2]Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Татарстан, Российская Федерация, 420061, г. Казань, ул. Сеченова, 13а
[3]Казанский государственный медицинский университет, Российская Федерация, 420012, г. Казань, ул. Бутлерова, 49
[4]Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Марий Эл, Российская Федерация, 424007, г. Йошкар-Ола, ул. Машиностроителей, 121
[5]Федеральный центр гигиены и эпидемиологии, Российская Федерация, 117105, г. Москва, Варшавское шоссе, 19А
[6]Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Республике Башкортостан, Российская Федерация, 450054, г. Уфа, ул. Рихарда Зорге, 58

Несмотря на то что на сегодняшний день проводится качественная водоочистка, существует вероятность попадания возбудителей инфекционных заболеваний в водопроводную сеть. Санитарно-вирусологический контроль водоисточников и питьевой воды в настоящее время осуществляется непосредственно по прямому определению вирусов, а также по косвенным показателям вирусного загрязнения – колифагам.

Изучены спектры вирусов, содержащихся в воде системы централизованного водоснабжения, методами лабораторной диагностики, регламентированными для определения нормируемых показателей.

В течение 2014–2023 гг. были отобраны пробы воды системы централизованного водоснабжения (n = 2 847 568). С использованием классических культуральных методов бактериологии и вирусологии, молекулярно-генетического и серологического метода описана динамика и структура контаминации воды системы централизованного водоснабжения вирусами гепатита А (HAV), ротавируса (Rotavirus), энтеровируса (Enterovirus), норовируса (Norovirus), астровируса (Astrovirus), вируса COVID-19 (SARs-CoV-2) и аденовируса (Adenovirus).

По данным проведенных исследований установлено, что за период 2014–2023 гг. средний удельный вес проб воды централизованного водоснабжения, не соответствующих санитарно-гигиеническим нормативам в РФ, по наличию вирусов составил 0,57 %, наличию колифагов – 0,21 %. Доля проб воды централизованного водоснабжения по содержанию Rotavirus составила 1,41 % (95 % ДИ: 1,33–1,49) (по данным серологических исследований – 0,08 % проб (95 % ДИ: 0,06–0,10)), Enterovirus – 0,71 % (95 % ДИ: 0,57–0,86) (по данным ПЦР-исследований – 0,37 % проб

© Трухина Г.М., Бадамшина Г.Г., Попцова Е.А., Ярославцева М.А., Волостнова Е.С., Гузаирова Э.Р., 2025

Трухина Галина Михайловна – доктор медицинских наук, профессор, заведующий отделом микробиологических методов исследования факторов окружающей среды (e-mail: trukhina@list.ru; тел.: 8 (905) 568-47-50; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9955-7447).

Бадамшина Гульнара Галимяновна – доктор медицинских наук, заведующий отделом микробиологических исследований; доцент кафедры гигиены, медицины труда (e-mail: ggbadamshina@yandex.ru; тел.: 8 (919) 692-04-90; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0088-6422).

Попцова Елена Анатольевна – главный врач (e-mail: e-poptsova@mail.ru; тел.: 8 (905) 182-86-15; ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3542-008X).

Ярославцева Марина Анатольевна – заведующий лабораторией, врач-бактериолог (e-mail: m-yaroslavceva@mail.ru; тел.: 8 (926) 536-95-01; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6719-4848).

Волостнова Елена Сергеевна – исполняющий обязанности заведующего отделением диагностики особо опасных инфекций, врач-бактериолог (e-mail: e.s.volostnova@mail.ru; тел.: 8 (903) 344-81-45; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6718-504X).

Гузаирова Эльгиза Ринатовна – специалист-эксперт отдела эпидемиологического надзора и санитарной охраны территории (e-mail: g_elgiza@mail.ru; тел.: 8 (937) 300-52-64; ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3086-0623).

(95 % ДИ: 0,33–0,42)), Adenovirus – 0,52 % (95 % ДИ: 0,38–0,70), Norovirus – 0,20 % (95 % ДИ: 0,16–0,24), Astrovirus – 0,14 % (95 % ДИ: 0,11–0,18), SARs-CoV-2 – 0,09 % (95 % ДИ: 0,03–0,20), HAV – 0,02 % (95 % ДИ: 0,01–0,04) (по данным серологических исследований несколько выше – 0,09 % проб (0,07–0,11)). Отмечена прямая сильная корреляционная связь показателей доли проб воды централизованного водоснабжения, не соответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям по наличию колифагов и возбудителей вирусных инфекций (r > 0,8), однако определение в питьевой воде нуклеиновых кислот молекулярно-генетическими методами, по сравнению с классическим исследованием на колифаги, обозначает более высокую распространенность вирусов.

Структура контаминации вирусами воды системы централизованного водоснабжения за 2020–2023 гг. была представлена Rotavirus (52,6 ± 0,3 %), Adenovirus (18,8 ± 0,5 %), Enterovirus (13,9 ± 0,2 %), Norovirus (7,5 ± 0,1 %), Astrovirus (3,8 ± 0,1 %), SARs-CoV-2 (3,4 ± 0,2 %).

Проведенными исследованиями установлено, что на сегодняшний день сохраняется необходимость изучения факторов риска кишечных инфекций вирусной природы, передающихся через воду, мониторинга контаминации вирусами воды системы централизованного водоснабжения, устойчивости вирусов к дезинфицирующим веществам, применения комбинированных методов дезинфекции при водоподготовке, изучения роли питьевой воды в возникновении вирусных инфекций.

Ключевые слова: *микрофлора воды, централизованное водоснабжение, вода централизованного водоснабжения, вирусы, контаминация, биологическая безопасность, аденовирус, ротавирус, энтеровирус, факторы риска.*

Обеспечение населения безопасной водой является одной из важнейших задач, стоящих перед международным сообществом на протяжении последних десятилетий [1, 2]. Состояние централизованного питьевого водоснабжения населения Российской Федерации требует проведения определенных мероприятий по совершенствованию системы водоподготовки [3]. Несмотря на то что на сегодняшний день проводится качественная водоочистка, существует вероятность попадания возбудителей инфекционных заболеваний в водопроводную сеть, например, вследствие изнашивания системы распределения воды и / или аварий на водопроводах и инфильтрации в водопровод сточной воды из поврежденного трубопровода системы водоотведения [1, 4, 5].

Исследования по комплексному изучению видовой распространенности вирусов в питьевой воде Российской Федерации довольно ограничены. Имеются данные иностранных исследователей, свидетельствующие о ведущей доле в структуре вирусной контаминации питьевой воды трех видов кишечных вирусов: *Adenovirus*, *Rotavirus*, *Enterovirus* [6]. Показана распространенность аденовирусов, энтеровирусов, ротавирусов в образцах очищенной питьевой воды на водоочистных сооружениях [6–8]. Показано обнаружение энтеровируса в 21 % проб очищенной питьевой воды в Китае (г. Ухань) (5/24) [6]; обнаружение аденовируса в Пакистане в 20 % проб водопроводной воды, энтеровируса – в 43 % проб, ротавируса – в 23 % проб [8]; установлено обнаружение энтеровируса в 27,4 % образцов, аденовируса – в 23,3 % и ротавируса – в 16,4 % образцов воды в Бразилии [7]. В обзоре, представленном в исследовании C. Mejías-Molina et al. (2024), по наблюдению, опубликованному за последние пять лет, помимо обнаружения аденовируса (17–48 %), ротавируса (1,5–44 %) и энтеровируса (0,9 %), отмечено обнаружение в воде норовируса (0,5–6,7 %) и вируса гепатита Е (0,8 %) [9].

Многолетними исследованиями подтверждена роль вирусов в возникновении инфекций, передающихся через воду[1] [10]. По данным Всемирной организации здравоохранения (2022), контаминация питьевой воды является одним из важнейших факторов риска передачи острых кишечных инфекций, вызванных *Adenovirus*, *Rotavirus*, *Enterovirus*, а также других возбудителей кишечных инфекций вирусной природы[1]. В РФ в ряде субъектов дополнительные случаи заболеваемости связаны с ненормативным качеством питьевой воды, в том числе по микробиологическим показателям. В 2023 г. заболеваемость, ассоциированная с ненормативным качеством питьевой воды, формировалась в 84 субъектах Российской Федерации и регистрировалась в диапазоне от 18,6 до 4167,7 дополнительного случая на 100 тысяч всего населения[2].

В настоящее время учреждениями Роспотребнадзора с целью профилактики инфекций, передающихся через воду, предусмотрены плановые мониторинговые исследования по выявлению контаминации питьевой воды как фактора риска заболеваемости кишечными инфекциями вирусной природы. Санитарно-вирусологический контроль водоисточников и питьевой воды на сегодня осуществляется по косвенным показателям вирусного загрязнения – колифагам и непосредственно по прямому определению вирусов [5, 11]. Для прямого определения вирусов по их геному (РНК и ДНК) в лабораториях санитарно-эпидемиологической службы широко используются молекулярно-генетические методы, в частности полимеразная цепная реакция (ПЦР), которая обладает высокой чувствительностью, доступна и позволяет в течение суток выявить контаминацию [5, 11]. Параллельное использование ПЦР и определение колифагов в воде обеспечивают наибольшую надежность в отношении вирусного загрязнения, так как позволяют определить и эпиде-

[1] WHO. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda [Электронный ресурс] // WHO. – 2022. – 614 p. – URL: https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064 (дата обращения: 03.10.2024).

[2] О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году: Государственный доклад. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2024. – 364 с.

миологическую значимость вирусов, определяемых по их РНК и ДНК [5]. Изучение контаминации воды централизованного водоснабжения как фактора риска здоровью с использованием современных методов лабораторной диагностики на сегодняшний день имеет особенную актуальность.

В связи с вышеизложенным, **цель исследования** – изучение спектра вирусов, содержащихся в воде системы централизованного водоснабжения, методами лабораторной диагностики, регламентированными для определения нормируемых показателей.

Материалы и методы. В течение 2014–2023 гг. ежегодно в рамках планового, внепланового и производственного контроля, санитарно-гигиенического мониторинга, проведенного учреждениями Роспотребнадзора в субъектах РФ, были исследованы пробы воды системы централизованного водоснабжения (n = 2 847 568) в соответствии с действующими на момент отбора методическими документами[3]. Пробы воды были отобраны в стерильные емкости перед подачей и в распределительной сети системы централизованного водоснабжения в 89 субъектах Российской Федерации; доставлены в лаборатории Центров гигиены и эпидемиологии в субъектах РФ с соблюдением требований по доставке с предварительным концентрированием вирусов преимущественно с использованием фильтрующих мембран[4].

Пробы воды были исследованы согласно действующим документам[5] классическими методами бактериологии и вирусологии на наличие колифагов и энтеровирусов *(Enterovirus)* соответственно; молекулярно-генетическими методами на наличие РНК вируса гепатита А *(HAV),* ротавируса (*Rotavirus), Enterovirus,* норовируса (*Norovirus)* (с 2018 г.), астровируса *(Astrovirus)* и SARs-CoV-2 (с 2018 и 2020 г., соответственно); ДНК аденовируса *(Adenovirus)* (с 2018 г.); серологическими методами на наличие антигена *HAV* и *Rotavirus.* Для проведения исследований использованы тест-системы преимущественно производства ФБУН «Центральный научно-исследовательский институт эпидемиологии» Роспотребнадзора («АмплиСенс ОКИ виро-скрин-FL», «АмплиСенс Cov-Bat FL»), ФБУН «Санкт-Петербургский НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Пастера» Роспотребнадзора (COVID-2019 Amp), АО «Вектор-Бест» (ВГА-антиген-ИФА-БЕСТ), ООО «БиолоТ (питательная среда «Игла МЕМ»). Результаты исследований учтены в форме Федерального статистического наблюдения № 18 «Сведения о санитарном состоянии субъекта Российской Федерации» и № 2.14–2.23 «Сведения о деятельности лабораторий санитарно-гигиенического, микробиологического и паразитологического профиля Федеральных бюджетных учреждений здравоохранения «Центров гигиены и эпидемиологии». Первичные данные были собраны и получены на базе ФБУЗ «Федеральный центр гигиены и эпидемиологии» Роспотребнадзора.

Пробы воды, не соответствующие санитарно-гигиеническим нормативам по наличию колифагов и вирусов, обозначены как «нестандартные пробы» (н/с)[6]. После обнаружения нестандартных проб были проведены санитарно-противоэпидемические, профилактические мероприятия. Обработка полученных результатов проведена с использованием программного обеспечения Microsoft Office v.2016. 95%-ный доверительный интервал (ДИ) для доли обнаруживаемых нестандартных проб рассчитывали с помощью функции BinomCI по методу Уилсона с исполь-

---

[3] МУК 4.2.3963-23. Бактериологические методы исследования воды: методические указания / утв. руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации А.Ю. Поповой 1 сентября 2023 г. [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1304575302 (дата обращения: 27.03.2025); МУК 4.2.1018-01. Санитарно-микробиологический анализ питьевой воды: методические указания / утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации – Первым заместителем министра здравоохранения Российской Федерации 9 февраля 2001 г. [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200029648 (дата обращения: 27.03.2025).

[4] МУК 4.2.2029-05. Санитарно-вирусологический контроль водных объектов: методические указания / утв. и введ. в действие Руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации Г.Г. Онищенко 18 ноября 2005 года [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200042984 (дата обращения: 16.04.2025).

[5] МУК 4.2.3963-23; МУК 4.2.2029-05. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году: Государственный доклад. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2024. – 364 с.; МУК 4.2.2746-10. Порядок применения молекулярно-генетических методов при обследовании очагов острых кишечных инфекций с групповой заболеваемостью: методические указания / утв. Руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации Г.Г. Онищенко 30 сентября 2010 г. [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200084387 (дата обращения: 16.04.2025).

[6] СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: санитарные правила и нормы / утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года № 2 (с изменениями на 30 декабря 2022 года) [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/573500115 (дата обращения: 16.04.2025).

зованием пакета библиотек DescTools программного обеспечения R. Оценку значимости тренда к снижению (увеличению) доли проб воды централизованного водоснабжения проводили с использованием метода Манн – Кендалла с использованием функции MannKendall программного обеспечения R. Тренд считался значимым при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. По данным проведенных исследований установлено, что средний удельный вес проб воды централизованного водоснабжения, не соответствующих санитарно-гигиеническим нормативам в РФ за период с 2014 по 2023 гг. по наличию вирусов, составил 0,57 %, наличию колифагов – 0,21 %, при этом к 2023 г. обнаружена тенденция к снижению удельного веса нестандартных проб ($p < 0,05$) (рис. 1). Отмечена прямая сильная корреляционная связь показателей доли проб воды централизованного водоснабжения, не соответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям по наличию колифагов и возбудителей вирусных инфекций ($r = 0,82$, $p = 0,04$), однако доля нестандартных проб по наличию нуклеиновых кислот вирусов в среднем была в 2,7 раза выше, что, вероятно, свидетельствует о более высокой информативности молекулярно-генетических исследований для оценки безопасности питьевого водоснабжения по микробиологическим показателям.

Результаты исследований на наличие антигенов возбудителей энтеровирусной (*Enterovirus*), ротавирусной инфекции (*Rotavirus*), гепатита А (*HAV*) в питьевой воде, проведенных разными методами лабораторной диагностики (культуральный, серологический, молекулярно-генетический), представлены в табл. 1–3.

Исходя из представленных за период 2014–2023 гг. данных, следует, что при оценке безопасности питьевого водоснабжения по наличию контаминации *Rotavirus* чаще выявлялся при определении молекулярно-генетическим методом, контаминация *HAV* – серологическим методом, контаминация *Enterovirus* – культуральным методом. Указанное требует дальнейшего изучения с учетом территориальных особенностей заболеваемости инфекциями и использования различных лабораторных методов исследований для мониторинга в регионах РФ.

Из представленных данных также следует, что доля проб питьевой воды, контаминированной *Rotavirus*, к 2023 г. значительно снизилась ($p = 0,003$). Для *HAV* и *Enterovirus* статистически значимого снижения доли проб воды, контаминированных вирусами, выявлено не было.

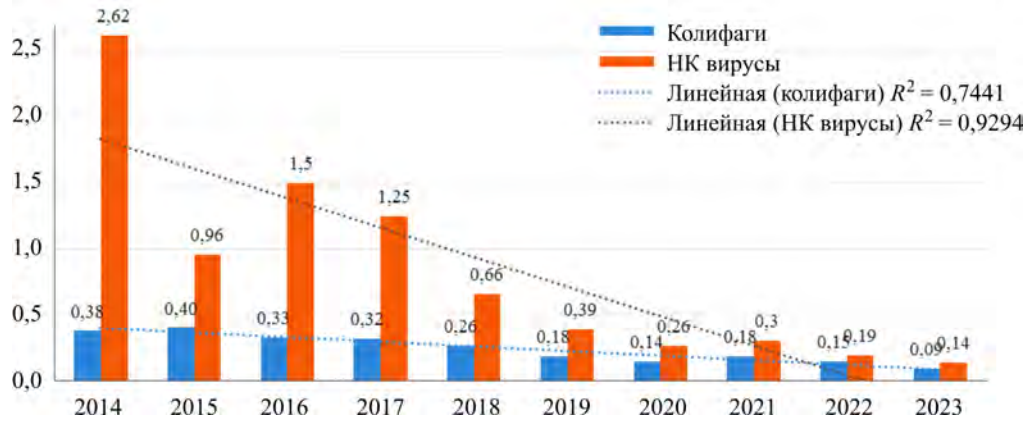


Рис. 1. Доля проб (%) воды централизованного водоснабжения, не соответствующих санитарно-гигиеническим нормативам по наличию вирусов и колифагов, в РФ в 2014–2023 гг.

Таблица 1

Показатели контаминации воды систем централизованного водоснабжения по наличию *Rotavirus* за 2014–2023 гг.

Год	Методом ПЦР				Серологическим методом			
	всего	из них с положительным результатом			всего	из них с положительным результатом		
	n	*n*	% н/с проб	95 % ДИ	*n*	*n*	% н/с проб	95 % ДИ
2014	5485	113	2,06	1,70–2,47	9112	11	0,12	0,16–0,22
2015	6962	144	2,07	1,75–2,43	8639	9	0,10	0,05–0,20
2016	7650	260	3,40	3,01–3,83	9463	11	0,12	0,06–0,21
2017	9454	262	2,77	2,45–3,12	8193	11	0,13	0,07–0,24
2018	10375	188	1,81	1,56–2,09	9406	11	0,12	0,06–0,21
2019	10816	131	1,21	1,01–1,44	9893	6	0,06	0,02–0,13
2020	6919	55	0,79	0,60–1,03	9169	3	0,03	0,01–0,10
2021	10684	65	0,61	0,47–0,77	7823	2	0,03	0,00–0,09
2022	10974	47	0,43	0,31–0,57	7783	2	0,03	0,00–0,09
2023	11751	19	0,16	0,10–0,25	7241	1	0,01	0,00–0,08
В целом (2014–2023 гг.)	91070	1284	1,41	1,33–1,49	86722	67	0,08	0,06–0,10

Таблица 2

Показатели контаминации воды систем централизованного водоснабжения по наличию *HAV* за 2014–2023 гг.

Год	Методом ПЦР				Серологическим методом			
	всего	из них с положительным результатом			всего	из них с положительным результатом		
	n	*n*	% н/с проб	95 % ДИ	*n*	*n*	% н/с проб	95 % ДИ
2014	1579	0	0,00	0,00–0,23	8844	13	0,15	0,08–0,25
2015	2947	0	0,00	0,00–0,12	9037	19	0,21	0,13–0,33
2016	3160	2	0,06	0,01–0,23	9237	3	0,03	0,01–0,09
2017	3416	1	0,03	0,03–0,16	9490	10	0,11	0,05–0,19
2018	2964	2	0,07	0,01–0,24	9898	3	0,03	0,01–0,09
2019	2819	0	0,00	0,00–0,13	10512	11	0,10	0,05–0,19
2020	2051	0	0,00	0,00–0,18	8022	12	0,15	0,08–0,26
2021	2770	0	0,00	0,00–0,13	6897	4	0,06	0,02–0,15
2022	3090	0	0,00	0,00–0,12	8446	1	0,01	0,00–0,07
2023	3931	0	0,00	0,00–0,09	8515	4	0,05	0,01–0,12
В целом (2014–2023 гг.)	28727	5	0,02	0,01–0,04	88898	80	0,09	0,07–0,11

Таблица 3

Показатели контаминации воды систем централизованного водоснабжения *Enterovirus* за 2014–2023 гг.

Год	Методом ПЦР				Культуральным методом			
	всего	из них с положительным результатом			всего	из них с положительным результатом		
	n	*n*	% н/с проб	95 % ДИ	*n*	*n*	% н/с проб	95 % ДИ
2014	5341	212	3,97	3,46–4,53	1431	6	0,42	0,15–0,91
2015	6629	14	0,21	0,12–0,35	1440	1	0,07	0,00–0,39
2016	7783	17	0,22	0,13–0,35	1867	73	3,91	3,08–4,89
2017	8813	9	0,10	0,05–0,19	2297	1	0,04	0,00–0,24
2018	8632	15	0,17	0,10–0,29	1398	0	0,00	0,00–0,26
2019	10216	8	0,08	0,03–0,15	1115	1	0,09	0,00–0,50
2020	4586	0	0,00	0,00–0,08	852	0	0,00	0,00–0,43
2021	6768	3	0,04	0,01–0,13	1119	0	0,00	0,00–0,33
2022	8589	8	0,09	0,04–0,18	825	0	0,00	0,00–0,45
2023	10427	3	0,03	0,01–0,08	1385	15	1,08	0,61–1,78
В целом (2014–2023 гг.)	77784	289	0,37	0,33–0,42	13729	97	0,71	0,57–0,86

Мониторинг наличия возбудителей других вирусных инфекций в воде централизованного водоснабжения молекулярно-биологическими методами ведется с 2018 г. (на наличие нуклеиновых кислот *Adenovirus*, *Norovirus*, *Astrovirus*) и 2020 г. (на наличие РНК SARs-CoV-2) и позволяет ежегодно определить контаминацию питьевой воды возбудителями острых кишечных и респираторных инфекций (табл. 4).

Анализ представленных данных показал, что доля проб воды централизованного водоснабжения, не соответствующих санитарно-гигиеническим нормативам по содержанию *Adenovirus*, *Astrovirus*, *Norovirus*, SARs-CoV-2, за исследуемый период практически не изменилась.

Для наглядного изображения структуры выделенных возбудителей вирусных инфекций в воде централизованного водоснабжения были проанализированы данные мониторинга молекулярно-биологическими методами за 2020–2023 гг. (рис. 2).

Стоит отметить, что в структуре возбудителей вирусных инфекций преобладал *Rotavirus* более чем в 2 раза, реже выявлялись *Adenovirus и Enterovirus,* наименьший удельный вес занимали *Norovirus и Astrovirus. HAV* за период 2020–2023 гг. в воде централизованного водоснабжения обнаружен не был, однако с 2014 по 2019 г. выделялся в пробах воды эпизодически, а также антиген вируса обнаруживался ежегодно серологическими методами (см. табл. 2).

Результатами проведенных исследований установлено, что, несмотря на наличие тенденции к снижению, в среднем за последнее десятилетие в РФ пробы воды системы централизованного водоснабжения не соответствовали нормативам по наличию возбудителей кишечных инфекций вирусной природы в 0,57 % случаев; по наличию одного из основных индикаторных показателей (колифаги) – в 0,21 % случаев, что свидетельствует о необходимости проведения дальнейшего мониторинга безопасности питьевой воды и водоисточников по микробиологическим показателям [5, 12, 13] и наличии вероятности заражения вирусными инфекциями

Таблица 4

Показатели контаминации воды систем централизованного водоснабжения вирусами за 2018–2023 гг.

Наименование	Показатель	Год						
		2018	2019	2020	2021	2022	2023	Итого
Adenovirus	*n*	1014	1639	451	1495	1344	2697	8640
из них с положительным результатом	*n*	17	8	2	2	6	10	45
	% н/с проб	1,68	0,49	0,44	0,13	0,45	0,37	0,52
	95 % ДИ	0,98–2,67	0,21–0,96	0,05–1,59	0,02–0,48	0,16–0,97	0,18–0,68	0,38–0,70
Norovirus	*n*	8286	8966	6235	9927	10385	11033	54832
из них с положительным результатом	*n*	23	11	11	25	13	27	110
	% н/с проб	0,28	0,12	0,18	0,25	0,13	0,25	0,20
	95 % ДИ	0,18–0,42	0,06–0,22	0,09–0,32	0,16–0,37	0,07–0,21	0,16–0,36	0,16–0,24
Astrovirus	*n*	6382	8142	5765	8743	9112	9913	48057
из них с положительным результатом	*n*	4	7	5	28	12	13	69
	% н/с проб	0,06	0,09	0,09	0,32	0,13	0,13	0,14
	95 % ДИ	0,02–0,16	0,03–0,18	0,03–0,20	0,21–0,46	0,07–0,23	0,07–0,22	0,11–0,18
SARs-CoV-2	*n*	–	–	2019	2084	1375	296	5774
из них с положительным результатом	*n*	–	–	1	4	0	0	5
	% н/с проб	–	–	0,05	0,19	0,00	0,00	0,09
	95 % ДИ			0,00–0,28	0,05–0,49	0,00–0,27	0,00–1,24	0,03–0,20

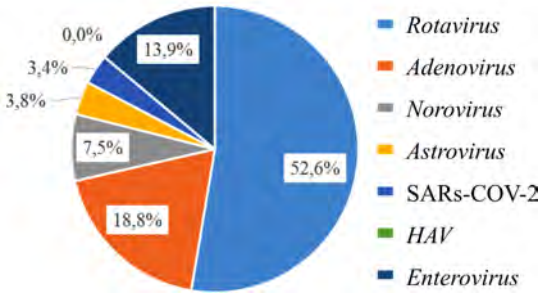


Рис. 2. Структура выделенных возбудителей вирусных инфекций в воде централизованного водоснабжения за 2020–2023 гг.

населения РФ при употреблении контаминированной питьевой воды[7].

Проведенный анализ показал, что определение одного из основных индикаторных показателей (колифаги) в некоторой степени отражает наличие контаминации воды возбудителями кишечных инфекций вирусной природы ($r = 0,82$). Однако учитывая, что в данном исследовании доля нестандартных проб по наличию нуклеиновых кислот вирусов в среднем была в 2,7 раза выше, по сравнению с таковой для колифагов, индикаторный показатель «колифаги» в полной мере не может отразить контаминацию воды вирусами, возбудителями кишечных инфекций. Указанное сопоставимо с утверждениями авторов, что колифаги не могут быть надежными индикаторами кишечных вирусов при оценке безопасности питьевой воды[8] [14], и подтверждено изоляцией кишечных вирусов из очищенных и дезинфицированных запасов питьевой воды, которая дала отрицательные результаты в обычных тестах на колифаги[9]. Исследованиями показано отсутствие корреляции контаминации воды норовирусами, аденовирусами, ротавирусами и колифагами в воде водоемов и водопроводной воде [6, 14]. Обнаружение кишечных вирусов в образцах воды указывает на загрязнение сточными водами [15] и свидетельствует о наличии риска заражения возбудителями кишечных инфекций вирусной природы для населения при употреблении контаминированной питьевой воды[8].

Отсутствие выявления контаминированных проб воды по основному индикаторному показателю «колифаги» при наличии контаминации возбудителями кишечных инфекций вирусной природы также может свидетельствовать о более высокой информативности молекулярно-генетических исследований для оценки безопасности питьевого водоснабжения по микробиологическим показателям [15, 16].

Вместе с тем методы на основе ПЦР (полимеразная цепная реакция) обычно используются для обнаружения и идентификации вирусного заражения воды, хотя ПЦР сама по себе не позволяет различать инфекционные и неинфекционные вирусные частицы [15]. Кроме того, в воде могут присутствовать ингибиторы, которые предотвращают амплификацию нуклеиновых кислот посредством полимеразной цепной реакции [17]. По результатам выявления *Enterovirus* методом ПЦР установлены обнаружения НК вируса лишь в 0,37 % проб, что почти в 2 раза ниже по сравнению с культуральным методом – 0,71 % проб. Указанное может являться следствием присутствия в воде как ингибиторов ПЦР, так и быть объяснено вирусной интерференцией [18, 18, 19]. В обзоре

[7] WHO. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda [Электронный ресурс] // WHO. – 2022. – 614 p. – URL: https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064 (дата обращения: 03.10.2024).

[8] Там же.

[9] Там же.

литературы, представленном О.Н. Савостиковой и соавт. [20], показано, что в воде водоисточников возможно обнаружение различных химических веществ, в том числе являющихся ингибиторами ПЦР. О наличии загрязнения воды инфекционными и неинфекционными вирусными частицами, наряду с различной информативностью молекулярно-генетического и серологического метода, о предположительном наличии в питьевой воде ингибиторов ПЦР и условий для вирусной интерференции также может свидетельствовать выявление РНК вируса и антигена вируса *HAV* в 0,02 и 0,09 % проб воды соответственно. Указанное требует дальнейшего изучения с учетом территориальных особенностей заболеваемости инфекциями и использования различных лабораторных методов исследований для мониторинга в регионах РФ.

Учитывая вышеизложенное, стоит отметить, что для оценки факторов риска заражения кишечными вирусами возрастает роль изучения безопасности воды комплексными методами лабораторной диагностики. Иностранными исследователями обозначена значимость сочетания вирусологического метода с использованием клеточной культуры и метода ПЦР, позволяющего обнаружить инфекционные вирусы, которые растут медленно или не вызывают цитопатических эффектов в клеточной культуре [15]. Несколько исследований продемонстрировали связь между вирусной персистенцией (определяемой молекулярными методами) и инфекционностью (определяемой анализом цитопатического эффекта), указывая на то, что деградация вирусных нуклеиновых кислот показывает сильную корреляцию с потерей вирусной инфекционности [16].

Распространенность контаминации вирусами в РФ была значительно ниже по сравнению с данными, представленными зарубежными исследователями (в данном исследовании *Rotavirus* был обнаружен в 1,41 % проб, *Enterovirus* – в 0,70 %, *Adenovirus* – в 0,52 %), что свидетельствует об эффективности дезинфекционных мероприятий в процессе водоподготовки, предусмотренных в стране, для управления рисками заболеваемостью кишечными инфекциями вирусной природы. Различия, обнаруженные в процессе обсуждения полученных результатов, в том числе в структуре контаминации грунтовых вод и поверхностных водоисточников для питьевого водоснабжения, требуют отдельного внимания и являются основанием для постановки новых исследовательских задач. Иностранными исследователями показана общая распространенность вируса гепатита Е в питьевой воде на уровне 4,7 % [21], что также требует отдельного внимания российских исследователей.

В целом за период 2014–2023 гг. доля проб воды централизованного водоснабжения, не соответствующих санитарно-микробиологическим основным показателям, составила: по *Norovirus* – 0,20 % проб, *Astrovirus* – 0,14 %, SARs-CoV-2 – 0,09 %, *HAV* – 0,02 %. Исследования по контаминации питьевой воды *Astrovirus*, *Norovirus*, SARs-CoV-2, *HAV* мало освещены в доступной нам литературе. Однако имеются некоторые данные по распространенности вирусов в Тайланде в водохранилище, речной воде и т.п., в которой с разным уровнем распространенности обнаружены различные генотипы *Astrovirus* в 4,8 % образцов (в питьевой воде РФ, по данным настоящего исследования, *Astrovirus* обнаруживался в 0,14 % проб) [16]. Исследователи утверждают, что *Astrovirus* является преобладающим видом в воде окружающей среды [16], для некоторых генотипов из которых описаны случаи межвидовой передачи [22]. Изучение фактора риска заболеваемости кишечными инфекциями, вызванными *Astrovirus,* при употреблении питьевой воды требует отдельного внимания исследователей.

Наличие контаминации питьевой воды вирусами свидетельствует об устойчивости вирусов к средствам дезинфекции в процессе водоподготовки. Самый высокий уровень удаления вирусов в процессе водоподготовки авторы отмечают для *Enterovirus* (97 % вирусов удаляется при дезинфекции) и *Rotavirus* (82 % удаляется при дезинфекции), более низкий отмечают для *Adenovirus* (73 %) [6]. Учитывая структуру выделенных возбудителей вирусных инфекций в воде централизованного водоснабжения, представленную на рис. 2, за 2020–2023 гг. на фоне обязательного проведения дезинфекции, стоит предположить, что наиболее устойчивыми к дезинфицирующим средствам в процессе водоподготовки в РФ были *Rotavirus*, несколько реже *Adenovirus*, *Norovirus* и *Enterovirus.* Авторами описана устойчивость некоторых из указанных вирусов к дезинфекции воды и экологическим стрессорам, особенно к инактивации ультрафиолетовым светом [15, 23]. В связи с этим исследователями обозначена необходимость применения комбинированного метода дезинфекции воды [5] для профилактики риска развития инфекционных заболеваний.

Принимая во внимание, что вирусы гепатита А, COVID-19 и астровирусной инфекции в структуре отсутствовали или занимали незначительную долю, стоит предположить, что дезинфекционные мероприятия, проводимые в процессе водоподготовки в РФ в течение 2020–2023 гг. в отношении данных вирусов, циркулирующих на территории страны, были эффективными.

Выводы. Таким образом, анализ результатов исследования воды системы централизованного водоснабжения, отобранной как перед подачей, так и внутри распределительной сети, показал, что, несмотря на тенденцию к снижению за период 2014–2023 гг., по санитарно-вирусологическим показателям продолжают выявляться пробы питьевой воды, не соответствующие санитарно-эпидемиологическим требованиям (в среднем – по наличию вирусов – 0,57 %, по наличию колифагов – 0,21 %), что обусловливает наличие факторов риска развития заболеваний при употреблении питьевой воды, контаминированной возбудителями кишечных инфекций вирусной природы.

За период 2014–2023 гг. доля проб воды централизованного водоснабжения, не соответствующих санитарно-микробиологическим показателям, составила: по наличию *Rotavirus* – 1,41 % проб (95 % ДИ:

1,33–1,49) (по данным серологических исследований – 0,08 % проб (0,06–0,10)), *Enterovirus* – 0,71 % (95 % ДИ: 0,57–0,86) (по данным ПЦР-исследований – 0,37 % проб (95 % ДИ: 0,33–0,42)), *Adenovirus* – 0,52 % (95 % ДИ: 0,38–0,70), *Norovirus* – 0,20 % (95 % ДИ: 0,16–0,24), *Astrovirus* – 0,14 % (95 % ДИ: 0,11–0,18), SARs-CoV-2 – 0,09 % (95 % ДИ: 0,03–0,20), *HAV* – 0,02 % (95 % ДИ: 0,01–0,04) (по данным серологических исследований – несколько выше – 0,09 % проб (0,07–0,11)). Структура контаминации вирусами воды системы централизованного водоснабжения за 2020–2023 гг. была представлена *Rotavirus* (52,6 ± 0,3 %), *Adenovirus* (18,8 ± 0,5 %), *Enterovirus* (13,9 ± 0,2 %), *Norovirus* (7,5 ± 0,1 %), *Astrovirus* (3,8 ± 0,1 %), SARs-CoV-2 (3,4 ± 0,2 %). Указанное свидетельствует о необходимости дальнейшего изучения факторов риска возникновения отдельных нозологических форм кишечных инфекций вирусной природы, связанных с употреблением питьевой воды, для прогнозирования заболеваемости и проведения профилактических мероприятий.

Отмечена прямая сильная корреляционная связь показателей доли проб воды централизованного водоснабжения, не соответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям по наличию колифагов и возбудителей вирусных инфекций ($r > 0,8$), однако определение в питьевой воде нуклеиновых кислот молекулярно-генетическими методами, по сравнению с классическим исследованием на колифаги, обозначает более высокую распространенность вирусов. Указанное, вероятно, требует отдельного внимания при оценке безопасности питьевой воды по основному нормируемому показателю «колифаги». Отсутствие подтверждения в обработанной воде контаминации вирусов культуральными методами, высокие показатели контаминации антигенами при отрицательных ПЦР-тестах свидетельствуют о необходимости разработки надежных дополнительных тестов, подтверждающих инфекционность вирусов и наличие ингибиторов реакций амплификации.

Выявление в питьевой воде вирусов различных родов свидетельствует о наличии факторов риска кишечных заболеваний при употреблении питьевой воды в РФ, о необходимости мониторинга устойчивости вирусов к дезинфицирующим веществам, применения комбинированных методов дезинфекции при водоподготовке, изучения роли питьевой воды в возникновении вирусных инфекций. Полученные данные могут быть применены для расчета прогноза показателя заболеваемости отдельными формами кишечных инфекций, экономического ущерба и планирования профилактических мероприятий.

Финансирование. Источник финансирования исследования не предусмотрен.

Конфликт интересов. Авторы статьи сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Попова А.Ю., Кузьмин С.В., Механтьев И.И. Оценка эффективности реализации системного подхода к обеспечению гигиенической безопасности питьевого и рекреационного водопользования населения на примере Воронежской области // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. – 2021. – Т. 29, № 8. – С. 7–14. DOI: 10.35627/2219-5238/2021-29-8-7-14

2. Санитарно-эпидемиологические особенности рекреационного водопользования Туапсинского района Краснодарского края / Е.П. Лаврик, Г.М. Трухина, А.Г. Кравченко, С.А. Высотин, А.Т. Высотина, Н.А. Дмитриева // Гигиена и санитария. – 2021. – Т. 100, № 9. – С. 910–916. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-9-910-916

3. Байдакова Е.В., Унгуряну Т.Н., Михайлова Р.И. К количественной оценке микробного риска, связанного с экспозицией кишечных вирусов в питьевой воде // Анализ риска здоровью. – 2019. – № 2. – С. 108–114. DOI: 10.21668/health.risk/2019.2.12

4. Ерхов А.А. SARS-COV-2: Канализация как путь передачи // Строительство и техногенная безопасность. – 2023. – № 30 (82). – С. 105–112.

5. Рахманин Ю.А., Онищенко Г.Г. Гигиеническая оценка питьевого водообеспечения населения Российской Федерации: проблемы и пути рационального их решения // Гигиена и санитария. – 2022. – Т. 101, № 10. – С. 1158–1166. DOI: 10.47470/0016-9900-2022-101-10-1158-1166

6. Real-time PCR detection of enteric viruses in source water and treated drinking water in Wuhan, China / X.Y. Ye, X. Ming, Y.L. Zhang, W.Q. Xiao, X.N. Huang, Y.G. Cao, K.D. Gu // Curr. Microbiol. – 2012. – Vol. 65, № 3. – P. 244–253. DOI: 10.1007/s00284-012-0152-1

7. Human adenovirus (HAdV), human enterovirus (hEV), and genogroup A rotavirus (GARV) in tap water in southern Brazil / M. Kluge, J.D. Fleck, M.C. Soliman, R.B. Luz, R.B. Fabres, J. Comerlato, J.V.S. Silva, R. Staggemeier [et al.] // J. Water Health. – 2014. – Vol. 12, № 3. – P. 526–532. DOI: 10.2166/wh.2014.202

8. Rashid M., Khan M.N., Jalbani N. Detection of Human Adenovirus, Rotavirus, and Enterovirus in Tap Water and Their Association with the Overall Quality of Water in Karachi, Pakistan // Food Environ. Virol. – 2021. – Vol. 13, № 1. – P. 44–52. DOI: 10.1007/s12560-020-09448-8

9. Exploring waterborne viruses in groundwater: Quantification and Virome characterization via passive sampling and targeted enrichment sequencing / C. Mejías-Molina, I. Estarlich-Landajo, S. Martínez-Puchol, S. Bofill-Mas, M. Rusiñol // Water Res. – 2024. – Vol. 266. – P. 122305. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122305

10. Norovirus GII.3[P12] Outbreak Associated with the Drinking Water Supply in a Rural Area in Galicia, Spain, 2021 / C. Jacqueline, M. Del Valle Arrojo, P. Bellver Moreira, M.A. Rodríguez Feijóo, M. Cabrerizo, M.D. Fernandez-Garcia // Microbiol. Spectr. – 2022. – Vol. 10, № 4. – P. e0104822. DOI: 10.1128/spectrum.01048-22

11. Сравнительная устойчивость полиовирусов, вируса гепатита А и их РНК к воздействию ультрафиолетового облучения / А.Е. Недачин, Р.А. Дмитриева, Т.В. Доскина, В.А. Долгин // Гигиена и санитария. – 2019. – Т. 98, № 11. – С. 1240–1244. DOI: 10.47470/0016-9900-2019-98-11-1240-1244

12. Особенности вирусного загрязнения питьевой воды в Архангельской области / И.И. Бобун, Р.В. Бузинов, Л.А. Шишко, В.П. Болтенков, Б.А. Моргунов, А.Б. Гудков // Экология человека. – 2016. – № 2. – С. 3–7.

13. Слежение за циркуляцией вирусов на основе мониторинга сточных вод – как эффективный инструмент контроля за инфекциями и профилактики биологических угроз / Н.В. Поклонская, Т.В. Амвросьева, Ю.Б. Колтунова, Ю.А. Шилова, И.В. Бельская // Новости медико-биологических наук. – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 104–111.

14. Alternative fecal indicators and their empirical relationships with enteric viruses, *Salmonella enterica*, and *Pseudomonas aeruginosa* in surface waters of a tropical urban catchment / L. Liang, S.G. Goh, G.G.R.V. Vergara, H.M. Fang, S. Rezaeinejad, S.Y. Chang, S. Bayen, W.A. Lee [et al.] // Appl. Environ. Microbiol. – 2015. – Vol. 81, № 3. – P. 850–860. DOI: 10.1128/AEM.02670-14

15. Evaluation and molecular characterization of human adenovirus in drinking water supplies: viral integrity and viability assays / G. Fongaro, M.A. Nascimento, C. Rigotto, G. Ritterbusch, A.D. da Silva, P.A. Esteves, C.R. Barardi // Virol. J. – 2013. – Vol. 10. – P. 166. DOI: 10.1186/1743-422X-10-166

16. Detection of Six Different Human Enteric Viruses Contaminating Environmental Water in Chiang Mai, Thailand / K. Kumthip, P. Khamrin, H. Ushijima, N. Maneekarn // Microbiol. Spectr. – 2023. – Vol. 11, № 1. – P. e0351222. DOI: 10.1128/spectrum.03512-22

17. Причины ложно-негативной ПЦР и недопущение некоторых из них / А.В. Чемерис, Д.А. Чемерис, Э.Г. Магданов, Р.Р. Гарафутдинов, Н.Р. Нагаев, В.А. Вахитов // Биомика. – 2012. – Т. 4, № 1. – С. 31–47.

18. Интерферирующее взаимодействие вирусов в регуляции эпидемического процесса / Ф.И. Ларин, Л.И. Жукова, В.В. Лебедев, Г.К. Рафеенко // Эпидемиология и инфекционные болезни. – 2012. – № 1. – С. 25–29.

19. Viral Interference as a Factor of False-Negative in the Infectious Adenovirus Detection Using Integrated Cell Culture-PCR with a BGM Cell Line / D. Sano, R. Watanabe, W. Oishi, M. Amarasiri, M. Kitajima, S. Okabe // Food Environ. Virol. – 2021. – Vol. 13, № 1. – P. 84–92. DOI: 10.1007/s12560-020-09453-x

20. Ксенобиотики и продукты их трансформации в сточных водах (обзор литературы) / О.Н. Савостикова, Р.А. Мамонов, И.А. Тюрина, А.В. Алексеева, Н.И. Николаева // Гигиена и санитария. – 2021. – Т. 100, № 11. – С. 1218–1223. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-11-1218-1223

21. Hepatitis E Virus in Water Environments: A Systematic Review and Meta-analysis / G.R. Takuissu, S. Kenmoe, L. Ndip, J.T. Ebogo-Belobo, C. Kengne-Ndé, D.S. Mbaga, A. Bowo-Ngandji, M.G. Oyono [et al.] // Food Environ. Virol. – 2022. – Vol. 14, № 3. – P. 223–235. DOI: 10.1007/s12560-022-09530-3

22. Mendenhall I.H., Smith G.J.D., Vijaykrishna D. Ecological Drivers of Virus Evolution: Astrovirus as a Case Study // J. Virol. – 2015. – Vol. 89, № 14. – P. 6978–6981. DOI: 10.1128/JVI.02971-14

23. Риск для здоровья населения и эффективность мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения / Н.В. Зайцева, С.В. Клейн, И.В. Май, А.А. Савочкина, Д.А. Кирьянов, М.Р. Камалтдинов, С.А. Вековшинина // Гигиена и санитария. – 2022. – Т. 101, № 11. – С. 1403–1411. DOI: 10.47470/0016-9900-2022-101-11-1403-1411

Контаминация вирусами воды систем централизованного водоснабжения как фактор риска здоровью: особенности многолетней динамики в Российской Федерации / Г.М. Трухина, Г.Г. Бадамшина, Е.А. Попцова, М.А. Ярославцева, Е.С. Волостнова, Э.Р. Гузаирова // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 2. – С. 87–97. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.07

UDC 628.1.033:578.8(470+571)
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.07.eng

Read online

Research article

VIRUS CONTAMINATION OF CENTRALIZED WATER SUPPLY SYSTEMS AS A HEALTH RISK FACTOR: FEATURES OF LONG-TERM DYNAMICS IN THE RUSSIAN FEDERATION

G.M. Trukhina[1], G.G. Badamshina[2,3], E.A. Poptsova[4], M.A. Yaroslavtseva[5], E.S. Volostnova[2], E.R. Guzairova[6]

[1]Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman, 2 Semashko St., Mytishchi, Moscow Region, 141014, Russian Federation
[2]Center of Hygiene and Epidemiology in the Republic of Tatarstan, 13a Sechenova St., Kazan, 420061, Russian Federation
[3]Kazan State Medical University, 49 Butlerova St., Kazan, 420012, Russian Federation
[4]Center of Hygiene and Epidemiology in Mari El, 121 Mashinostroitelei St., Yoshkar-Ola, 424007, Russian Federation
[5]Federal Center for Hygiene and Epidemiology, 19A Varshavskoe Shosse, Moscow, 117105, Russian Federation
[6]Federal Service for Surveillance over Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Republic of Bashkortostan Regional Office, 58 Rikharda Zorge St., Ufa, 450054, Russian Federation

Despite the fact that high-quality water treatment is currently being carried out, there is a possibility that pathogens of infectious diseases may enter a water supply network. Sanitary and virologic control of water sources and drinking water is currently performed directly by direct detection of viruses, as well as by using indirect indicators of viral contamination, namely, coliphages.

The aim was to study the spectrum of viruses contained in water from a centralized water supply system using laboratory diagnostic methods regulated to determine rated indicators.

Over 2014–2023, water samples were taken from a centralized water supply system (n = 2,847,568). The dynamics and structure of water contamination with hepatitis A (HAV), Rotavirus, Enterovirus, Norovirus, Astrovirus, COVID-19 (SARs-CoV-2) viruses, and Adenovirus in a centralized water supply system were described using classical cultural methods of bacteriology and virology, molecular-genetic and serological methods.

The conducted research found that over 2014–2023, the average proportion of centralized water supply samples that did not meet sanitary and hygienic standards in the Russian Federation was 0.57 % for the presence of viruses and 0.21 % for the presence of coliphages for the period from 2014 to 2023. The proportion of centralized water supply samples per non-conforming Rotavirus contents was 1.41 % (95 % CI: 1.33–1.49) (according to serological studies, 0.08 % of samples (95 % CI: 0.06–0.10); Enterovirus, 0.71 % (95 % CI: 0.57–0.86) (according to PCR studies, 0.37 % (95 % CI: 0.33–0.42); Adenovirus, 0.52 % (95 % CI: 0.38–0.70); Norovirus, 0.20 % (95 % CI: 0.16–0.24); Astrovirus, 0.14 % (95 % CI: 0.11–0.18); SARs-CoV-2, 0.09 % (95 % CI: 0.03–0.20); HAV, 0.2 % (95 % CI: 0.01–0.04) (according to serological studies, it was slightly higher (0.09 % (95 % CI: 0.07–0.11). A direct strong correlation was established between the proportion of centralized water supply samples that did not meet sanitary and epidemiological requirements and the presence of coliphages and pathogens of viral infections (r > 0.8); however, determination of nucleic acids in drinking water by molecular genetic methods indicates higher prevalence of viruses as compared to classical coliphage testing.

The structure of virus contamination in water from a centralized water supply system was represented by Rotavirus (52.6 ± 0.3 %), Adenovirus (18.8 ± 0.5 %), Enterovirus (13.9 ± 0.2 %), Norovirus (7.5 ± 0.1 %), Astrovirus (3.8 ± 0.1 %), and SARs-CoV-2 (3.4 ± 0.2 %) over 2020–2023.

Keywords: *water microflora, centralized water supply, water of centralized water supply, viruses, contamination, biological safety, adenovirus, rotavirus, enterovirus, risk factors.*

References

1. Popova A.Yu., Kuzmin S.V., Mehantyev I.I. Assessment of Implementation Efficiency of the System Approach to Ensuring Safety of Public Drinking and Recreational Water Use on the Example of the Voronezh Region. *ZNiSO*, 2021, vol. 29, no. 8, pp. 7–14. DOI: 10.35627/2219-5238/2021-29-8-7-14 (in Russian).

2. Lavrik E.P., Trukhina G.M., Kravchenko A.G., Vysotin S.A., Vysotina A.T., Dmitrieva N.A. Sanitary and epidemiological features of recreational water use of the Tuapse district of the Krasnodar region. *Gigiena i sanitariya*, 2021, vol. 100, no. 9, pp. 910–916. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-9-910-916 (in Russian).

3. Baydakova E.V., Unguryanu T.N., Mikhaylova R.I. On quantitative assessment of microbe risk caused by exposure to enteric viruses in drinking water. *Health Risk Analysis*, 2019, no. 2, pp. 108–114. DOI: 10.21668/health.risk/2019.2.12.eng

4. Erkhov A.A. SARS-CoV-2: Sewerage as a transmission route. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*, 2023, no. 30 (82), pp. 105–112 (in Russian).

5. Rakhmanin Yu.A., Onishchenko G.G. Hygienic assessment of drinking water supply of the population of the Russian Federation: problems and the way their rational decision. *Gigiena i sanitariya*, 2022, vol. 101, no. 10, pp. 1158–1166. DOI: 10.47470/0016-9900-2022-101-10-1158-1166 (in Russian).

6. Ye X.Y., Ming X., Zhang Y.L., Xiao W.Q., Huang X.N., Cao Y.G., Gu K.D. Real-time PCR detection of enteric viruses in source water and treated drinking water in Wuhan, China. *Curr. Microbiol.*, 2012, vol. 65, no. 3, pp. 244–253. DOI: 10.1007/s00284-012-0152-1

7. Kluge M., Fleck J.D., Soliman M.C., Luz R.B., Fabres R.B., Comerlato J., Silva J.V.S., Staggemeier R. [et al.]. Human adenovirus (HAdV), human enterovirus (hEV), and genogroup A rotavirus (GARV) in tap water in southern Brazil. *J. Water Health*, 2014, vol. 12, no. 3, pp. 526–532. DOI: 10.2166/wh.2014.202

© Trukhina G.M., Badamshina G.G., Poptsova E.A., Yaroslavtseva M.A., Volostnova E.S., Guzairova E.R., 2025

Galina M. Trukhina – Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Microbiological Methods for Studying Environmental Factors (e-mail: trukhina@list.ru; tel.: +7 (905) 568-47-50; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9955-7447).

Gulnara G. Badamshina – Doctor of Medical Sciences, Head of the Department of Microbiological Research; Associate Professor of Hygiene and Labour Medicine Department (e-mail: ggbadamshina@yandex.ru; tel.: +7 (919) 692-04-90; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0088-6422).

Elena A. Poptsova – chief physician (e-mail: e-poptsova@mail.ru; tel.: +7 (905) 182-86-15; ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3542-008X).

Marina A. Yaroslavtseva – Head of Laboratory-bacteriologist (e-mail: m-yaroslavceva@mail.ru; tel.: +7 (926) 536-95-01; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6719-4848).

Elena S. Volostnova – Acting Head of the Department of Particularly Dangerous Infections Diagnostics, bacteriologist (e-mail: e.s.volostnova@mail.ru; tel.: +7 (903) 344-81-45; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6718-504X).

El'giza R. Guzairova – specialist-expert of the Department of Epidemiological Surveillance and Sanitary Protection of the Territory (e-mail: g_elgiza@mail.ru; tel.: +7 (937) 300-52-64; ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3086-0623).

8. Rashid M., Khan M.N., Jalbani N. Detection of Human Adenovirus, Rotavirus, and Enterovirus in Tap Water and Their Association with the Overall Quality of Water in Karachi, Pakistan. *Food Environ. Virol.*, 2021, vol. 13, no. 1, pp. 44–52. DOI: 10.1007/s12560-020-09448-8

9. Mejías-Molina C., Estarlich-Landajo I., Martínez-Puchol S., Bofill-Mas S., Rusiñol M. Exploring waterborne viruses in groundwater: Quantification and Virome characterization via passive sampling and targeted enrichment sequencing. *Water Res.*, 2024, vol. 266, pp. 122305. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122305

10. Jacqueline C., Del Valle Arrojo M., Bellver Moreira P., Rodríguez Feijóo M.A., Cabrerizo M., Fernandez-Garcia M.D. Norovirus GII.3[P12] Outbreak Associated with the Drinking Water Supply in a Rural Area in Galicia, Spain, 2021. *Microbiol. Spectr.*, 2022, vol. 10, no. 4, pp. e0104822. DOI: 10.1128/spectrum.01048-22

11. Nedachin A.E., Dmitrieva R.A., Doskina T.V., Dolgin V.A. Comparative stability of poliovirus, hepatitis a virus and their RNA to the impact of ultraviolet radiation. *Gigiena i sanitariya*, 2019, vol. 98, no. 11, pp. 1240–1244. DOI: 10.47470/0016-9900-2019-98-11-1240-1244 (in Russian).

12. Bobun I.I., Buzinov R.V., Shishko L.A., Boltenkov V.P., Gudkov A.B. Features of Viral Contamination of Drinking Water in Arkhangelsk Region. *Ekologiya cheloveka*, 2016, no. 2, pp. 3–7 (in Russian).

13. Paklonskaya N.V., Amvrosieva T.V., Kaltunova Yu.B., Shilova Yu.A., Belskaya I.V. Wastewater based epidemiology as an effective tool for infection surveillance and biological hazards prevention. *Novosti mediko-biologicheskikh nauk*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 104–111 (in Russian).

14. Liang L., Goh S.G., Vergara G.G.R.V., Fang H.M., Rezaeinejad S., Chang S.Y., Bayen S., Lee W.A. [et al.]. Alternative fecal indicators and their empirical relationships with enteric viruses, *Salmonella enterica*, and *Pseudomonas aeruginosa* in surface waters of a tropical urban catchment. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2015, vol. 81, no. 3, pp. 850–860. DOI: 10.1128/AEM.02670-14

15. Fongaro G., Nascimento M.A., Rigotto C., Ritterbusch G., da Silva A.D., Esteves P.A., Barardi C.R. Evaluation and molecular characterization of human adenovirus in drinking water supplies: viral integrity and viability assays. *Virol. J.*, 2013, vol. 10, pp. 166. DOI: 10.1186/1743-422X-10-166

16. Kumthip K., Khamrin P., Ushijima H., Maneekarn N. Detection of Six Different Human Enteric Viruses Contaminating Environmental Water in Chiang Mai, Thailand. *Microbiol. Spectr.*, 2023, vol. 11, no. 1, pp. e0351222. DOI: 10.1128/spectrum.03512-22

17. Chemeris A.V., Chemeris D.A., Magdanov E.G., Garafutdinov R.R., Nagaev N.R., Vakhitov V.A. Causes of false-negative PCR and how to avoid some of them. *Biomics*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 31–47 (in Russian).

18. Larin V.F., Zhukova L.I., Lebedev V.V., Rafeyenko G.K. Interference interaction of viruses in the regulation of an epidemic process. *Epidemiologiya i infektsionnye bolezni*, 2012, no. 1, pp. 25–29 (in Russian).

19. Sano D., Watanabe R., Oishi W., Amarasiri M., Kitajima M., Okabe S. Viral Interference as a Factor of False-Negative in the Infectious Adenovirus Detection Using Integrated Cell Culture-PCR with a BGM Cell Line. *Food Environ. Virol.*, 2021, vol. 13, no. 1, pp. 84–92. DOI: 10.1007/s12560-020-09453-x

20. Savostikova O.N., Mamonov R.A., Turina I.A., Alekseeva A.V., Nikolaeva N.I. Xenobiotics and products of their transformation in wastewater (literature review). *Gigiena i sanitariya*, 2021, vol. 100, no. 11, pp. 1218–1223. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-11-1218-1223 (in Russian).

21. Takuissu G.R., Kenmoe S., Ndip L., Ebogo-Belobo J.T., Kengne-Ndé C., Mbaga D.S., Bowo-Ngandji A., Oyono M.G. [et al.]. Hepatitis E Virus in Water Environments: A Systematic Review and Meta-analysis. *Food Environ. Virol.*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 223–235. DOI: 10.1007/s12560-022-09530-3

22. Mendenhall I.H., Smith G.J.D., Vijaykrishna D. Ecological Drivers of Virus Evolution: Astrovirus as a Case Study. *J. Virol.*, 2015, vol. 89, no. 14, pp. 6978–6981. DOI: 10.1128/JVI.02971-14

23. Zaitseva N.V., Kleyn S.V., May I.V., Savochkina A.A., Kiryanov D.A., Kamaltdinov M.R., Vekovshinina S.A. Methodical grounds and experience gained in implementing complex assessment of activities aimed at risk to public health and effectiveness of measures to improve the quality of drinking water in centralized water supply systems. *Gigiena i sanitariya*, 2022, vol. 101, no. 11, pp. 1403–1411. DOI: 10.47470/0016-9900-2022-101-11-1403-1411 (in Russian).

Trukhina G.M., Badamshina G.G., Poptsova E.A., Yaroslavtseva M.A., Volostnova E.S., Guzairova E.R. Virus contamination of centralized water supply systems as a health risk factor: features of long-term dynamics in the Russian Federation. Health Risk Analysis, 2025, no. 2, pp. 87–97. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.07.eng

Получена: 23.04.2025
Одобрена: 22.05.2025
Принята к публикации: 22.06.2025

УДК 614.446
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.08

Читать онлайн

Научная статья

ВЫДЕЛЕНИЕ И ОПИСАНИЕ ШТАММОВ *BACILLUS CEREUS* КАК ФАКТОРОВ РИСКА ПИЩЕВЫХ ОТРАВЛЕНИЙ ПИЦЦЕЙ С ГОВЯДИНОЙ (ХАНОЙ, ВЬЕТНАМ)

Пхам Нгок Ха[1], Нинх Тхи Нанх[1], Ву Кханх Ван[1], Тран Ле Минх[2], Нгуен Тханх Трунг[1]

[1]Национальный институт контроля пищевой продукции, Вьетнам, г. Ханой, ул. Пхам Тхан Дуат, 65
[2]Медицинский университет Ханоя, Вьетнам, г. Ханой, ул. Тон Тхат Тунг, 1

Бактерия Bacillus cereus является одной из основных причин пищевых отравлений во всем мире. В рамках данного исследования выделено 10 штаммов B. cereus из образцов пиццы с говядиной как установленной причины пищевого отравления детей в двух детских садах A и B в 2024 г. во Вьетнаме.

Идентификация вида бактерий была выполнена при помощи биохимических тестов и использования технологии MALDI-TOF; профиль устойчивости к антибиотикам был построен согласно рекомендациям M45 CLSI, а также изучено наличие генов токсинов cytK, bceT, hbl (hblA, hblC, и hblD) и nhe (nheA, nheB, and nheC) в выделенных штаммах. Установлено, что выделенные штаммы B. cereus обладали высоким уровнем устойчивости к нескольким антибиотикам, включая пенициллин (100 %), ванкомицин (100 %), стрептомицин (90 %), тетрациклин (80 %), ампициллин (70 %) и эритромицин (70 %). Помимо этого, 100 % штаммов B. cereus (10/10), выделенных из образца пиццы с говядиной, показали положительный результат в тесте на определение гена токсина bceT; 80 % штаммов (8/10) были позитивны на ген токсина cytK, а 60 % штаммов (6/10) показали наличие генов токсинов nheA и nheC при отсутствии гена рвотного токсина NRPS. Исследование вносит вклад в базу данных об устойчивости к антибиотикам штаммов B. cereus, связанных с пищевыми отравлениями во Вьетнаме, а его результаты являются базой для разработки справочных материалов, актуальных для быстрой диагностики пищевого отравления, связанного с бактериями типа B. cereus.

Ключевые слова: *Bacillus cereus, пищевое отравление, устойчивость к антибиотикам, M45 CLSI, bceT, cytK, hbl, nhe.*

По разным оценкам, бактерия *B. cereus* считается причиной почти 12 % инцидентов пищевых отравлений во всем мире. Согласно данным Центра по контролю и предотвращению заболеваний (CDC) в США, бактерии вида *Bacillus* spp вызвали 619 вспышек пищевых отравлений с общим количествам случаев заболеваний 7385, из них 75 случаев тяжелого заболевания и трех смертей, за период с 1998 по 2015 г. [1]. В Китае за период с 2010 по 2020 г. было зарегистрировано 419 вспышек пищевых отравлений, вызванных *B. cereus*, с общим количеством пострадавших 7892 человека, из которых 2786 человек были госпитализированы, а пять случаев закончились смертельным исходом [2]. Во Вьетнаме также были зарегистрированы многочисленные вспышки отравлений с участием *B. cereus*. Например, в 2020 г. 230 человек отравились едой, загрязненной бактериями *Escherichia coli (E. coli), Staphylococcus aureus (S. aureus)* и *B. cereus*, в одном из вегетарианских ресторанов в Да Нанге. В том же году десятки детей дошкольного возраста были госпитализированы в Кан Тхо после употребления в пищу супа пхо и йогурта, обсемененных *B. cereus*. В 2022 г. более 600 студентов в Нха Транг были госпитализированы после употребления в пищу жареных куриных крылышек, загрязненных *Salmonella*, *B. cereus* и *E. coli*, и один исход был фатальным.

Бактерия *B. cereus* – это грамположительная палочковидная бактерия семейства *Bacillaceae* и

© Пхам Нгок Ха, Нинх Тхи Нанх, Ву Кханх Ван, Тран Ле Минх, Нгуен Тханх Трунг, 2025

Нгуен Тханх Трунг – кандидат наук, руководитель лаборатории микробиологии продуктов питания (e-mail: trungnt@nifc.gov.vn; тел.: + 84349363269; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8732-9911).

Пхам Нгок Ха – магистр, научный сотрудник лаборатории микробиологии продуктов питания (e-mail: hapn0411@gmail.com; тел.: + 84963991575; ORCID: https://orcid.org/0009-0001-1248-3404).

Нинх Тхи Нанх – научный сотрудник лаборатории микробиологии продуктов питания (e-mail: ninhhanh891997@gmail.com; тел.: + 84338273077; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9693-3507).

Ву Кханх Ван – научный сотрудник лаборатории микробиологии продуктов питания (e-mail: khanhvan2180@gmail.com; тел.: + 84345096509).

Тран Де Минх – студент (e-mail: minhtranle.work@gmail.com; тел.: + 84985364352).

одна из самых распространенных причин пищевых отравлений. Бактерия *B. cereus* повсеместно обнаруживается в почве, воде и пищевых продуктах, в особенности рисе, готовых продуктах и молочных продуктах[1]. Следует заметить, что бактерия *B. cereus* устойчива к нагреванию, а ее споры обладают высокой лекарственной устойчивостью, что позволяет данному штамму выживать в разных условиях окружающей среды. Бактерия *B. cereus* способна вырабатывать токсины и вызывает два вида последствий пищевых отравлений, сопровождающихся преимущественно рвотой (токсины обычно возникают уже при потреблении загрязненных пищевых продуктов) и / или диареей (токсины продуцируются бактерией после того, как загрязненный продукт попадает в ЖКТ) [3].

Широкое применение антибиотиков привело к возникновению лекарственной устойчивости у многих штаммов бактерий, включая *B. cereus*, которая часто продуцирует ферменты β-лактамазы, обеспечивающие сильную устойчивость к β-лактамным антибиотикам [4]. Согласно рекомендациям Института клинических и лабораторных стандартов (CLSI), штаммы *B. cereus* в основном восприимчивы к аминогликозидам, клиндамицину, хлорамфениколу, эритромицину и ванкомицину. Однако в нескольких исследованиях отмечается, что бактерия *B. cereus* обладает устойчивостью к тетрациклину, стрептомицину, ципрофлоксацину, клоксациллину, эритромицину и рифампицину [5].

Отравления, сопровождающиеся преимущественно диареей, связаны с негемолитическим энтеротоксином (*nhe*), гемолизином BL (*hbl*), цитотоксином K (*cytK*) и энтеротоксином T (*bceT*)[2] [6–8]. Однако данные об энтеротоксическом потенциале *bceT*, приведенные в нескольких исследованиях, остаются противоречивыми [9, 10]. Отравления, сопровождающиеся преимущественно рвотой, связаны с геном рвотного токсина NRPS (нерибосомная пептидная синтетаза) бактерии *B. cereus* и продукцией таких токсичных пептидов, как Cereulide и isocereulides A-G. Этот ген функционирует независимо от конвенционального синтеза белков и позволяет бактерии эффективно синтезировать опасные вещества, повышающие вирулентность *B. cereus* при вспышках пищевых отравлений [11].

В Ханое, где при приготовлении пищи применяются в основном традиционные способы, необходим постоянный мониторинг и описание штаммов B. cereus, связанных со вспышками пищевых отравлений, для определения их происхождения, понимания их эпидемиологических характеристик и разработки эффективных профилактических мер.

Цель исследования – построение профиля лекарственной устойчивости и определение генов вирулентности штаммов бактерии *B. cereus*, обусловивших в 2024 г. в Ханое вспышки пищевой этиологии в двух детских садах при употреблении пиццы с говядиной.

Материалы и методы. В качестве причины отравления дошкольников в двух детских садах (условно А и В) были определены 10 штаммов бактерии *B. cereus*, выделенных из образцов пиццы с говядиной. Оба дошкольных учреждения расположены в г. Ханое и находятся под единым управлением. Случаи отравления зарегистрированы в 2024 г. В учреждении А пострадали 135 детей дошкольного возраста, у которых были диагностированы желудочно-кишечные расстройства. В учреждении В было зарегистрировано 77 детей дошкольного возраста с тем же диагнозом. Все соответствующие образцы пищевых продуктов были отобраны на месте, заморожены в холодильных устройствах и направлены в Национальный институт контроля пищевой продукции для анализа.

Выделение* и *идентификация штаммов B. cereus в образцах пиццы с говядиной. Определение *B. cereus* было выполнено в соответствии с международным стандартом ISO 7932: 2004[3] (TCVN 4992: 2005), а именно 10 г каждого образца пищевого продукта были гомогенизированы в 90 мл пептонной воды (Merck). Для каждого образца была подготовлена серия растворов 10^{-5}, и 100 мкл каждого раствора были инокулированы на маннитол-агаре с добавлением яичного желтка и полимиксина (MYP; Merck). Инкубация во всех чашках продолжалась в течение одной ночи при температуре 37 °C. Колонии с типичными морфологическими признаками (плоские, диаметр – 2–3 мм, зубчатые края, розоватый цвет, окружены чистым пространством) были отобраны для гемолиза на кровяном агаре и биохимических тестов с применением углеводного набора API 50 (bioMerieux, Франция). Типичные колонии *B. cereus*, показавшие положительный результат в биохимических тестах, хранились при температуре -80 °C. Для идентификации эти колонии в виде тонких полосок были помещены на соевый агар Tryptone (TSA; Merck), инкубированы в течение 24 ч при 37 °C, а затем идентифицированы с применением метода матрично-активированной лазерной десорбции / ионизации – время пролетной детекции MALDI-TOF на приборе VITEK® MS

---

[1] Comparative analysis of Bacillus anthracis, Bacillus cereus, and related species on the basis of reverse transcriptase sequencing of 16S rRNA / C. Ash, J.A. Farrow, M. Dorsch, E. Stackebrandt, M.D. Collins // Int. J. Syst. Bacteriol. – 1991. – Vol. 41, № 3. – P. 343–346. DOI: 10.1099/00207713-41-3-343

[2] The bceT gene of Bacillus cereus encodes an enterotoxic protein / N. Agata, M. Ohta, Y. Arakawa, M. Mori // Microbiology (Reading). – 1995. – Vol. 141, Pt 4. – P. 983–988. DOI: 10.1099/13500872-141-4-983

[3] ISO 7932: 2004 Microbiology of food and animal feeding stuffs – Horizontal method for the enumeration of presumptive Bacillus cereus – Colony-count technique at 30 degrees C [Электронный ресурс] // ISO. – 2004. – 3rd ed. – URL: https://www.iso.org/standard/38219.html (дата обращения: 15.11.2024).

(BioMérieux SA, Marcy l'Etoile, Франция). В качестве контрольного штамма применялся *E. coli* ATCC 8739.

Оценка профиля лекарственной устойчивости штаммов B. cereus, обнаруженных в образцах пиццы с говядиной. Лекарственная устойчивость штаммов *B. cereus* была оценена при помощи метода диско-диффузии в тесте Кирби – Бауэра[4]. Бактерии *B. cereus* выращивались в 10 мл стерильного бульона с сердечно-мозговой вытяжкой до тех пор, пока плотность клеток не достигала 0,5 стандарта Мак-Фарланда, что составляет примерно $1{,}5 \cdot 10^8$ КОЕ/мл. Для распределения бактериальной суспензии на агаре Muller – Hinton применялся стерильный мазок. Согласно рекомендациям M45 CLSI было протестировано 11 типов антибиотиков, включая ампициллин (АМП, 10 мкг/диск), хлорамфеникол (Х, 30 мкг/диск), ципрофлоксацин (ЦИП, 5 мкг/диск), эритромицин (ЭРИ, 15 мкг/диск), имипенем (ИПМ, 10 мкг/диск), меропенем (МРП, 10 мкг/диск), офлоксацин (ОФК, 5 мкг/диск), пенициллин (ПРЛ, 10 МЕ/диск), стрептомицин (С, 10 мкг/диск), тетрациклин (ТЕ, 30 мкг/диск) и ванкомицин (ВАН, 30 мкг/диск). Диски были размещены на поверхности агара при помощи стерильных хирургических щипцов для последующей инкубации при температуре 37 °С в течение 18 ч. Результаты тестов на лекарственную устойчивость были получены при помощи измерения диаметра зоны подавления, представленной четко видимой областью вокруг диска с антибиотиком.

Определение генов токсинов B. cereus в образцах пиццы с говядиной. Метод экстракции ДНК. 10 штаммов *B. cereus*, выделенных из образов пиццы с говядиной, хранились при температуре -80 °С. Они были размещены тонкими полосками на кровяном агаре для обнаружения чистых штаммов, культивированных в бульоне с сердечно-мозговой вытяжкой (Brain Heart Infusion broth), и инкубированы в течение 18–24 часов при температуре 37 °С. Полная ДНК *B. cereus* была выделена в соответствии с протоколом для грамположительных бактерий для набора очистки геномной ДНК GeneJET (Thermofisher; C5042). Общая концентрация ДНК штаммов *B. cereus* была определена с применением наноспектрофотометра со спектральной поглощательной способностью 260 нм. До применения раствор ДНК хранился при температуре -20 °С.

ПЦР и мультиплексная ПЦР. Пары праймеров, использованных в рамках данного исследования для обнаружения генов рвотных и диарейных токсинов штаммов *B. cereus*, обнаруженных в образцах пиццы с говядиной, приведены в табл. 1. Простая ПЦР применялась для пар bceT-F/R, EM1F/R и *cytK*F/R, в то время как для оставшихся пар праймеров была использована мультиплексная ПЦР.

Смесь для ПЦР (25 мкл) состояла из 12,5 мкл мастер-смеси 2X PCR (Thermo Scientific), 1 мкл прямого праймера (10 пкмоль), 1 мкл обратного праймера (10 пкмоль), 3 мкл шаблона ДНК и 7,5 мкл деионизированной воды. Условия температурного цикла для пары праймеров EM1F / EM1R были определены следующим образом: 95 °С в течение 15 мин; (95 °С в течение 30 с; 60 °С на 30 с; 72 °С на 60 с) на 30 циклов, затем 72°С в течение 5 мин и удержание при 4 °С. Условия температурного цикла для пары праймеров bceT-F / bceT-R были определены следующим образом: 94 °С в течение 5 мин; (94 °С в течение 45 с; 55 °С на 45 с; 72 °С на 2 мин) на 30 циклов, затем

Таблица 1

Пары праймеров, использованные для обнаружения генов токсинов *B. cereus*

Наименование	Последовательность (5'-3')	Ген	Размер (по)	Ссылка
bceT-F	CGT ATC GGT CGT TCA CTC GG	Enterotoxin *bceT*	662	[12]
bceT-R	GTT GAT TTT CCG TAG CCT GGG			
EM1F	GAC AAG AGA AAT TTC TAC GAG CAA GTA CAA T	NRPS	635	[13]
EM1R	GCA GCC TTC CAA TTA CTC CTT CTG CCA CAG T			
nheAF	TAC GCT AAG GAG GGG C	*nheA*	499	[14]
nheAR	GTT TTT ATT GCT TCA TCG GCT			
nheBF	CTA TCA GCA CTT ATG GCA G	*nheB*	769	
nheBR	ACT CCT AGC GGT GTT CC			
nhCF	CGG TAG TGA TTG CTG GG	*nheC*	581	
nhCR	CAG CAT TCG TAC TTG CCA A			
hblAF	GTG CAG ATG TTG ATG CCG AT	*hbl*A	1154	
hblAR	ATG CCA CTG CCT GGA CAT A			
HbICF	GAT ACT AAT GTG GCA ACT GC	*hbl*C	740	
HbICR	TTG AGA CTG CTC GTT AGT TG			
HbIDF	AAT CAA GAG CTG TCA CGA AT	*hbl*D	829	
HbIDR	CAC CAA TTG ACC ATG CTA AT			
*CytK*F	CGA CGT CAC AAG TTG TAA CA	Cytotoxin-K	565	
*cytK*R	CGT GTG TAA ATA CCC CAG TT			

[4] Antibiotic susceptibility testing by a standardized single disk method / A.W. Bauer, W.M. Kirby, J.C. Sherris, M. Turck // Am. J. Clin. Pathol. – 1966. – Vol. 45, № 4. – P. 493–496.

Таблица 2

Уровни загрязнения бактериями *B. cereus* (КОЕ/г) образцов пищевой продукции, отобранных в учреждениях А и В

Блюдо	Учреждение А	Учреждение В
Жареная свиная вырезка	Н/О	$5{,}0 \cdot 10^1$
Смесь вареных овощей	Н/О	$6{,}0 \cdot 10^1$
Лапша с яйцом и морепродуктами	Н/О	$8{,}0 \cdot 10^1$
Пицца с говядиной	$6{,}0 \cdot 10^5$	$6{,}8 \cdot 10^5$

Примечание: Н/О – не обнаружено.

72 °С в течение 10 мин и удержание при 4 °С. Условия температурного цикла для пары праймеров cytKF / cytKR были определены следующим образом: 94 °С в течение 1 мин; (95 °С в течение 45 с; 54 °С на 1 мин; 72 °С на 2 мин) на 35 циклов, затем 72 °С в течение 5 мин и удержание при 4 °С.

Смесь для мультиплексной ПЦР (25 мкл) состояла из 12,5 мкл мастер-смеси 2X PCR (Thermo Scientific), 0,5 мкл каждого прямого праймера (20 пкмоль), 0,5 мкл каждого обратного праймера (20 пкмоль), 3 мкл шаблона ДНК и 3,5 мкл деонизированной воды. Условия температурного цикла для амплификации мультиплексной ПЦР генов *hblA, hblC, hblD, nheA, nheB,* и *nheC* были определены следующим образом: 94 °С / 2 мин; (95 °С / 15 с; 55 °С / 45 с; 72 °С / 2 мин) на 35 циклов, затем 72 °С / 5 мин и удержание при 4°С. Продукты ПЦР были разделены при помощи 1,5%-ного агарозного геля, приготовленного с применением буферного раствора 1X TAE и красителя Redsafe; подвергнуты процедуре электрофореза при 110 V в течение 50 мин с последующей УЗ-визуализацией. Для будущих исследований продукты ПЦР хранились при температуре -80 °С.

Результаты и их обсуждение. ***Выделение, идентификация и оценка загрязнения штаммами B. cereus образцов пиццы с говядиной, отобранных в дошкольных учреждениях А и В.*** Бактерия *B. cereus* была обнаружена в разных блюдах, но самые высокие ее концентрации – $6{,}0 \cdot 10^5$ КОЕ/г в дошкольном учреждении А и $6{,}8 \cdot 10^5$ КОЕ/г в дошкольном учреждении В (табл. 2) – были найдены в образцах пиццы с говядиной.

Следует отметить, что оба учреждения получали данное блюдо от одного и того же поставщика. В настоящее время во Вьетнаме отсутствуют стандарты безопасного уровня микроорганизмов в пицце. Что касается лимитов, установленных в других странах для уровней микробного загрязнения, следует упомянуть закон № 329 Республики Эстония, изданный в 2000 г., а также критерии микробиологической безопасности, установленные Национальным консультационным комитетом по микробиологическим стандартам для продуктов питания Департамента сельского хозяйства США. Согласно данным документам, максимальный уровень *B. cereus* в пицце[5] или готовой еде [15] составляет 10^3 КОЕ/г. Следовательно, предельно допустимый уровень был превышен в пицце с говядиной в дошкольных учреждениях А и В в 600 и 680 раз соответственно. Если же ориентироваться на допустимые уровни микробиологического загрязнения для готовой еды, установленные Кодексом пищевых стандартов Австралии и Новой Зеландии 2022[6], или Микробиологические рекомендации 2014 г., выпущенные Центром безопасности пищевых продуктов Гонконга[7], то приемлемый уровень для готовой еды, установленный в них, составляет 10^5 КОЕ/г. Следовательно, уровни загрязнения в учреждениях А и В превышают этот предел в 6 и 6,8 раза соответственно. Помимо этого, концентрация *B. cereus* на уровне $5{,}0 \cdot 10^1$ КОЕ/г, $6{,}0 \cdot 10^1$ КОЕ/г и $8{,}0 \cdot 10^1$ КОЕ/г была обнаружена в жареной свиной вырезке, смеси вареных овощей и лапше с яйцом и морепродуктами соответственно в учреждении В (см. табл. 2), что говорит о потенциальной передаче бактерий из пиццы с говядиной в данные блюда. Для лучшего понимания эпидемиологических характеристик и разработки эффективных профилактических мер штаммы *B. cereus*, выделенные из образцов пиццы с говядиной в обоих дошкольных учреждениях, были проанализированы с целью определения уровней лекарственной устойчивости.

Результаты гемолитических тестов показали, что все выделенные штаммы продуцировали бета-гемолитические зоны, что является характерной чертой *B. cereus* (рис. 1). Результаты идентификации по методу MALDI-TOF, полученные для 10 колоний, выделенных из образцов пиццы с говядиной в дошкольных учреждениях А и В, показали, что для всех проанализированных колоний балльная оценка по шкале MALDI-TOF превысила 2,0, что позволяет идентифицировать все колонии как *B. cereus* (10/10; 100 %). Прочие биохимические характеристики штаммов оценивались при помощи набора API 50 CHE4, в результате все 100 % (10/10) штаммов *B. cereus* показали положительный результат

[5] Governmental Regulation No. 166 of 2000 regarding validation of microbiological requirements for food groups [Электронный ресурс] // FAOLEX Database. – 2000. – URL: https://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC037807/ (дата обращения: 19.09.2024).

[6] Standard 1.6.1. Microbiological limits for food [Электронный ресурс] // Food Standards Australia New Zealand. – URL: https://www.foodstandards.gov.au/business/microbiological-limits (дата обращения: 19.09.2024).

[7] Food Legislation / Guidelines [Электронный ресурс] // Centre for Food Safety. – URL: https://www.cfs.gov.hk/english/food_leg/food_leg.html (дата обращения: 19.09.2024).

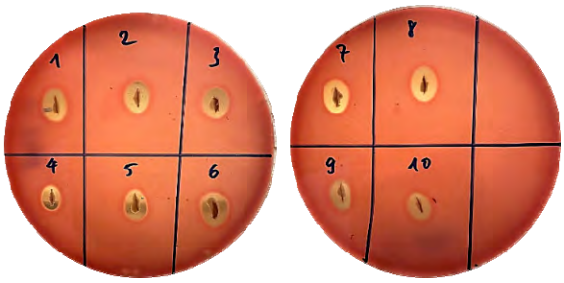


Рис. 1. Результаты гемолитического теста 10 штаммов *B. cereus*, выделенных из образцов пиццы с говядиной: 1–10 – выделенные штаммы *B. cereus*

на D-рибосому, D-глюкозу, D-фруктозу, N-ацетил глюкозамин, арбутин, эскулин / железистый цитрат, салицин, D-мальтозу, D-трехалозу, крахмал (амидон) и гликоген. 80 % (8/10) штаммов показали положительный результат на D-целлобиозу; 70 % (7/10) штаммов – на D-сахарозу (сукрозу) и 50 % (5/10) – на гентиобиозу (табл. 3).

Эти результаты согласуются с данными, опубликованными в Руководстве Берджи по систематике бактерий. Ферментация глицерина, гликогена и крахмала, а также свойства редуцирования эскулина / железистого цитрата, подтвержденные в данном биохимическом тесте, как правило, применяются для дифференциации *B. cereus* от близкородственных бактерий *Bacillus* sp.[8]

Профиль лекарственной устойчивости штаммов B. cereus, выделенных из образцов пиццы с говядиной. Все штаммы (n = 10; 100 %) оказались чувствительны к меропенему, а также показали высокую чувствительность к ципрофлоксацину (n = 9; 90 %). Результаты показали средний уровень устойчивости штаммов *B. cereus* к офлоксацину (n = 6; 60 %) и хлорамфениколу (n = 7; 70 %). Штаммы *B. cereus*, выделенные из образцов пиццы с говядиной, показали абсолютную устойчивость к пенициллину (n = 10; 100 %) и ванкомицину (n = 10; 100 %); также высока была устойчивость к стрептомицину (n = 9; 90 %), тетрациклину (n = 8; 80 %), ампициллину (n = 7; 70 %) и эритромицину (n = 7; 70 %); устойчивость к имипенему была средней (n = 6; 60 %) (рис. 2).

Согласно результатам тестирования, меропенем и ципрофлоксацин продемонстрировали перспективный уровень антимикробной активности в отношении штаммов *B. cereus*. В отличие от рекомендаций M45 CLSI, которые говорят о том, что *B. cereus* обычно устойчив к пенициллину, но зачастую чувствителен к ванкомицину и макролидам, в нашем исследовании было обнаружено, что штаммы *B. cereus*, выделенные из образцов пиццы с говядиной, показали 100%-ную устойчивость к ванкомицину 70%-ную – к эритромицину. M.N.S. Abdelaziz et al. (2024) изучили лекарственную устойчивость

Таблица 3

Доля штаммов *B. cereus* (n = 10) с положительным результатом тестов с применением набора API 50 CH

№	Тест	Конц., мг	%	№	Тест	Конц., мг	%
0	Отрицательный контроль		0	25	Эскулин / железистый цитрат	1,16 / 0,152	100
1	Глицерин	1,64	100	26	Салицин	1,04	100
2	Эритрол	1,44	0	27	D-целлобиоза	1,32	80
3	D-арабиноза	1,4	0	28	D-мальтоза	1,4	100
4	L-арабиноза	1,4	0	29	D-лактоза	1,4	0
5	D-рибоза	1,4	100	30	D-мелибиоза	1,32	0
6	D-ксилоза	1,4	0	31	D-сахароза	1,32	70
7	L-ксилоза	1,4	0	32	D-трехалоза	1,32	100
8	D-адонитол	1,36	0	33	Инулин	1,28	0
9	Метил-ß-D-ксилопиранозид	1,28	0	34	D-мелецитоза	1,32	0
10	D-галактоза	1,4	0	35	D-раффиноза	1,56	0
11	D-глюкоза	1,56	100	36	Крахмал	1,28	100
12	D-фруктоза	1,4	100	37	Гликоген	1,28	100
13	D-манноза	1,4	0	38	Ксилитол	1,4	0
14	L-сорбоза	1,4	0	39	Гентиобиоза	0,5	50
15	L-рамноза	1,36	0	40	D-тураноза	1,32	0
16	Дульчитол	1,36	0	41	D-ликсоза	1,4	0
17	Инозитол	1,4	0	42	D-тагатоза	1,4	0
18	D-маннитод	1,36	0	43	D-фукоза	1,28	0
19	D-сорбитол	1,36	0	44	L-фукоза	1,28	0
20	Метил-α-D-маннопиранозид	1,28	0	45	D-Arabitol	1,4	0
21	Метил-α-D-глюкопиранозид	1,28	0	46	L-арабитол	1,4	0
22	N-ацетил глюкозамин	1,28	100	47	Глюконат калия	1,84	0
23	Амигдалин	1,08	0	48	Калий 2-кетоглюконат	2,12	0
24	Арбутин	1,08	100	49	Калий 5-кетоглюконат	1,8	0

[8] Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. Volume One: The Archaea and the Deeply Branching and Phototrophic Bacteria / ed. by D.R. Boone, R.W. Castenholz, G.M. Garrity. – NY: Springer Publ., 2001. – 2nd ed. – 722 p.

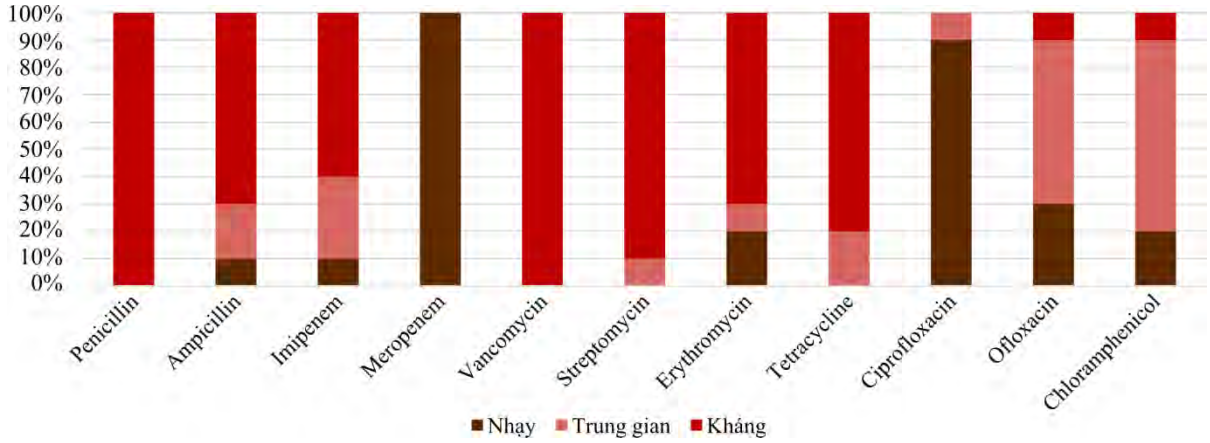


Рис. 2. Профиль лекарственной устойчивости *B. cereus*, определенный на основании диаметра зоны подавления (мм): красный – устойчивость, розовый – промежуточное состояние, коричневый – чувствительность

штаммов *B. cereus*, обнаруженных в пищевых продуктах в Японии, и обнаружили высокие уровни устойчивости к ванкомицину [16], что согласуется с данными нашего исследования. T. Nakayama (2021) показал, что штаммы *B. cereus*, выделенные из куриного мяса в городе Хо Ши Мин, обладали устойчивостью к ампициллину, ципрофлоксацину и тетрациклину [17], в то время как штаммы *B. cereus*, изученные в данном исследовании, были чувствительны к ципрофлоксацину и обладали устойчивостью к ампициллину и тетрациклину. При сравнении профиля лекарственной устойчивости 10 штаммов *B. cereus*, выделенных из образцов пиццы с говядиной при инциденте с пищевым отравлением в детском саду, и глобально циркулирующих штаммов *B. cereus* было обнаружено, что наши результаты подобны данным исследования A.M. Algammal et al. (2022). Штаммы *B. cereus*, циркулирующие в Египте, обладали чувствительностью к меропенему и показали устойчивость к нескольким антимикробным препаратам, включая эритромицин, стрептомицин и тетрациклин [18], подобно штаммам *B. cereus*, описанным в рамках данного исследования. Необходимы дальнейшие исследования вирулентности и генов лекарственной устойчивости на уровне ДНК для тщательного изучения эпидемиологических характеристик и внедрения эффективных мер профилактики против штаммов *B. cereus*, обнаруженных в образцах пиццы с говядиной.

Присутствие генов токсинов B. cereus в образце пиццы с говядиной. 10 штаммов *B. cereus*, выделенных из образцов пиццы с говядиной, связанные с инцидентом с пищевыми отравлениями в дошкольных учреждениях A и B в Ханое, были проанализированы на наличие генов рвотных (*NRPS*) и диарейных (*hblA, hblC, hblD, nheA, nheB, nheC, bceT* и *cytK*) токсинов при помощи ПЦР (*NRPS*, *bceT* и *cytK)* и мультиплексной ПЦР (*hblA, hblC, hblD, nheA, nheB,* и *nheC*). Результаты электрофореза (рис. 3–5) показали, что 100 % штаммов *B. cereus* (10/10), выделенных из образцов пиццы с говядиной, дали положительный результат на наличие гена *bceT*, 80 % (8/10) – гена *cytK*, и 60 % штаммов (6/10) – на наличие генов *nheA* и *nheC*. Кроме того, 100 % штаммов, изученных в данном исследовании (10/10), дали отрицательный результат на наличие гена *NRPS* (данное электрофорез-изображение не включено в исследование).

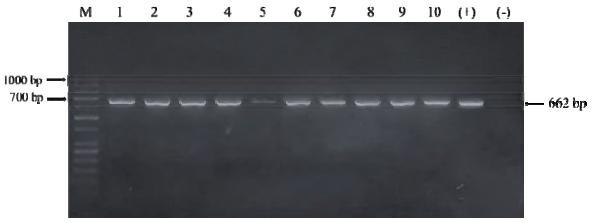


Рис. 3. Электрофорез продукта ПЦР гена токсина *bceT*: 1–10 – *bceT* – позитивен (662 по); M – лестница ДНК 50 по; (+) – положительный контроль; (-) – отрицательный контроль

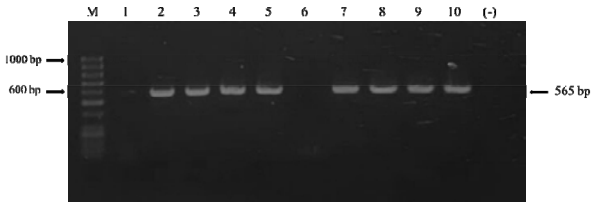


Рис. 4. Электрофорез продукта ПЦР гена токсина *cytK*: 1, 6 – отрицательно; 2–5 и 7–10 – *cytK* – позитивен (565 по); M – лестница ДНК 50 по; (-) – отрицательный контроль

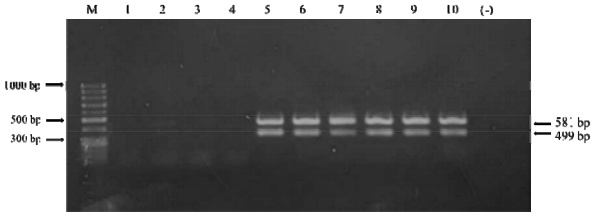


Рис. 5. Электрофорез-изображения продуктов мультиплексной ПЦР генов токсинов *hbl* (*hblA*, *hblC*, и *hblD*) и *nhe* (*nheA*, *nheB*, и *nheC*): 1–4 – отрицательно; 5–10 – *nhA* и *nhC* позитивен (581 по, 499 по); M – лестница ДНК 50 по; (-) – отрицательный контроль

Результаты нашего исследования согласуются с данными, описанными другими авторами в разных странах. В Ираке B.M.S. Saeed et al. (2021) описали очень низкий уровень обнаружения рвотного токсина во всех образцах пищевых продуктов, примерно на уровне 7,69 %, что говорит о низкой распространенности штаммов *B. cereus* с рвотным типом токсинов в пищевых продуктах [14]. N. Jessberger et al. (2021) [19] и M. Bağcioğlu et al. (2019) [20] также обнаружили, что рвотный тип *B. cereus* обнаруживался в пищевых продуктах значительно реже, чем диарейный. Наше исследование вносит определенный вклад в базу данных по штаммам *B. cereus,* циркулирующим во Вьетнаме. Более того, данные о штаммах *B. cereus*, несущих ген диарейного токсина, идентифицированных в рамках данного исследования, являются ценным ресурсом для разработки справочных материалов, необходимых для быстрой диагностики пищевого отравления вызывающими диарею бактериями типа *B. cereus*.

Выводы. В рамках данного исследования 10 штаммов *B. cereus* были выделены из образцов пиццы с говядиной и определены в качестве причины пищевого отравления дошкольников, посещающих учреждения A и B в Ханое. Выявленные уровни загрязнения *B. cereus* превышали допустимые уровни, установленные международными регулирующими документами; они составили $6{,}0 \cdot 10^5$ КОЕ/г в учреждении A и $6{,}8 \cdot 10^5$ КОЕ/г в учреждении B. В тестах с использованием 11 антибиотиков с целью определения уровней лекарственной устойчивости выделенных штаммов было обнаружено, что бактерии *B. cereus* обладали абсолютной устойчивостью (100 %) к пенициллину и ванкомицину, высоким уровнем устойчивости к стрептомицину (90 %), тетрациклину (80 %), ампициллину (70 %) и эритромицину (70 %); средним уровнем устойчивости к имипенему (60 %) и были чувствительны к меропенему (100 %) и ципрофлоксацину (90 %). Кроме того, 100 % штаммов *B. cereus* (10/10), обнаруженных в образцах пиццы с говядиной, дали положительный результат на ген токсина *bceT*, 80 % (8/10) – на ген токсина *cytK*, и 60 % штаммов (6/10) – на гены токсинов *nheA* и *nheC*, что указывает на принадлежность выделенных штаммов *B. cereus* к диарейному типу. Бактерия *B. cereus* остается основной патогенной угрозой по причине ее стремительной эволюции, носительства генов вирулентности и лекарственной устойчивости, что говорит о необходимости постоянного мониторинга генетического профиля и лекарственной устойчивости штаммов, циркулирующих во Вьетнаме, с целью предотвращения заболеваний и реагирования на возникающие вспышки отравлений.

Финансирование. Авторы выражают глубокую благодарность Национальному институту контроля пищевой продукции, Вьетнам, за предоставленное финансирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. McDowell R.H., Sands E.M., Friedman H. Bacillus Cereus [Электронный ресурс] // StatPearls. – Treasure Island (FL): StatPearls Publ., 2024. – URL: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK459121/ (дата обращения: 19.09.2024).

2. Epidemiological Evaluation of Bacillus cereus-Induced Foodborne Outbreaks – China, 2010–2020 / S. Duan, Y. Yu, Y. Guo, D. Lu, N. Li, Z. Liu, J. Liang, Y. Jiang [et al.] // China CDC Wkly. – 2023. – Vol. 5, № 33. – P. 737–741. DOI: 10.46234/ccdcw2023.140

3. Bottone E.J. Bacillus cereus, a Volatile Human Pathogen // Clin. Microbiol. Rev. – 2010. – Vol. 23, № 2. – P. 382–398. DOI: 10.1128/CMR.00073-09

4. Incidence, toxin gene profile, antibiotic resistance and antibacterial activity of Allium parvum and Allium cepa extracts on Bacillus cereus isolated from fermented millet-based food / A. Etikala, S. Thamburaj, A.M. Johnson, C. Sarma, G. Mummaleti, S.K. Kalakandan // LWT. – 2022. – Vol. 160, № 11. – P. 113314. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113314

5. Antimicrobial resistance among Pseudomonas spp. and the Bacillus cereus group isolated from Danish agricultural soil / L.B. Jensen, S. Baloda, M. Boye, F.M. Aarestrup // Environ. Int. – 2001. – Vol. 26, № 7–8. – P. 581–587. DOI: 10.1016/s0160-4120(01)00045-9

6. The Food Poisoning Toxins of Bacillus cereus / R. Dietrich, N. Jessberger, M. Ehling-Schulz, E. Märtlbauer, P.E. Granum // Toxins (Basel). – 2021. – Vol. 13, № 2. – P. 98. DOI: 10.3390/toxins13020098

7. The Pore-Forming Hemolysin BL Enterotoxin from Bacillus cereus: Subunit Interactions in Cell-Free Systems / F. Ramm, M. Stech, A. Zemella, H. Frentzel, S. Kubick // Toxins (Basel). – 2021. – Vol. 13, № 11. – P. 807. DOI: 10.3390/toxins13110807

8. Zhao Y., Sun L. Bacillus cereus cytotoxin K triggers gasdermin D-dependent pyroptosis // Cell Death Discov. – 2022. – Vol. 8, № 1. – P. 305. DOI: 10.1038/s41420-022-01091-5

9. Choma C., Granum P.E. The enterotoxin T (BcET) from Bacillus cereus can probably not contribute to food poisoning // FEMS Microbiol. Lett. – 2002. – Vol. 217, № 1. – P. 115–119. DOI: 10.1111/j.1574-6968.2002.tb11464.x

10. The Bacillus cereus bceT enterotoxin sequence reappraised / B.M. Hansen, P.E. Høiby, G.B. Jensen, N.B. Hendriksen // FEMS Microbiol. Lett. – 2003. – Vol. 223, № 1. – P. 21–24. DOI: 10.1016/S0378-1097(03)00249-0

11. Depsipeptide Intermediates Interrogate Proposed Biosynthesis of Cereulide, the Emetic Toxin of Bacillus cereus / S. Marxen, T.D. Stark, A. Rütschle, G. Lücking, E. Frenzel, S. Scherer, M. Ehling-Schulz, T. Hofmann // Sci. Rep. – 2015. – Vol. 5. – P. 10637. DOI: 10.1038/srep10637

12. Ehling-Schulz M., Fricker M., Scherer S. Identification of emetic toxin producing Bacillus cereus strains by a novel molecular assay // FEMS Microbiol. Lett. – 2004. – Vol. 232, № 2. – P. 189–195. DOI: 10.1016/S0378-1097(04)00066-7

13. Cở sở dữ liệu nhiệm vụ KHCN – Đánh giá khả năng phát hiện trực tiếp gen độc tố của Bacillus Cereus trong một số thực phẩm có nguồn gốc từ gạo bằng kỹ thuật Multiplex PCR [Электронный ресурс] // BỘ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ HỆ THỐNG THÔNG TIN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ. – URL: https://sti.vista.gov.vn/tw/Pages/tai-lieu-khcn.aspx?ItemID=199450&Type_CSDL=TAILIEUKHCN&Keyword=&searchInFields… (дата обращения: 08.10.2024).

14. Saeed B.M.S., Abbas B.A., Al-Jadaan S.A.N. Detection of Bacillus cereus genes responsible for diarrheal and emetic toxins // J. Phys. Conf. Ser. – 2021. – Vol. 1879, № 2. – P. 022034. DOI: 10.1088/1742-6596/1879/2/022034

15. National Advisory Committee On Microbiological Criteria For Foods. Response to Questions Posed by the Department of Defense Regarding Microbiological Criteria as Indicators of Process Control or Insanitary Conditions // J. Food Prot. – 2018. – Vol. 81, № 1. – P. 115–141. DOI: 10.4315/0362-028X.JFP-17-294

16. Genetic Characterization, Antibiotic Resistance, and Virulence Genes Profiling of Bacillus cereus Strains from Various Foods in Japan / M.N.S. Abdelaziz, M.G. Zayda, A.T. Maung, M. El-Telbany, T.N. Mohammadi, S.Z.C. Lwin, K.Z. Linn, C. Wang [et al.] // Antibiotics (Basel). – 2024. – Vol. 13, № 8. – P. 774. DOI: 10.3390/antibiotics13080774

17. Untargeted Phylogenetic Group III of Multi-drug-Resistant Bacillus cereus Isolated Using Fraser Medium from Retail Chickens in Ho Chi Minh City / T. Nakayama, T. Yamaguchi, M. Jinnai, S. Yamamoto, H.T. Li, P.T. Ngo, D.N.M. Tran, O.T.H. Nguyen [et al.] // Curr. Microbiol. – 2021. – Vol. 78, № 8. – P. 3115–3123. DOI: 10.1007/s00284-021-02562-1

18. Newly Emerging MDR B. cereus in Mugil seheli as the First Report Commonly Harbor nhe, hbl, cytK, and pc-plc Virulence Genes and bla1, bla2, tetA, and ermA Resistance Genes / A.M. Algammal, K.J. Alfifi, M. Mabrok, M. Alatawy, D.A. Abdel-Moneam, S. Alghamdi, M.M. Azab, R.A. Ibrahim [et al.] // Infect. Drug Resist. – 2022. – Vol. 15. – P. 2167–2185. DOI: 10.2147/IDR.S365254

19. The Bacillus cereus Food Infection as Multifactorial Process / N. Jessberger, R. Dietrich, P.E. Granum, E. Märtlbauer // Toxins. – 2020. – Vol. 12, № 11. – P. 701. DOI: 10.3390/toxins12110701

20. Detection and Identification of Bacillus cereus, Bacillus cytotoxicus, Bacillus thuringiensis, Bacillus mycoides and Bacillus weihenstephanensis via Machine Learning Based FTIR Spectroscopy / M. Bağcıoğlu, M. Fricker, S. Johler, M. Ehling-Schulz // Front. Microbiol. – 2019. – Vol. 10. DOI: 10.3389/fmicb.2019.00902

Выделение и описание штаммов Bacillus cereus как факторов риска пищевых отравлений пищей с говядиной (Ханой, Вьетнам) / Пхам Нгок Ха, Нинх Тхи Нанх, Ву Кханх Ван, Тран Ле Минх, Нгуен Тханх Трунг // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 2. – С. 98–106. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.08

UDC 614.446
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.08.eng

Read online

Research article

ISOLATION AND CHARACTERIZATION OF *BACILLUS CEREUS* STRAINS ISOLATED FROM A BEEF PIZZA FOOD POISONING INCIDENT IN HANOI

Pham Ngoc Ha[1], Ninh Thi Hanh[1], Vu Khanh Van[1], Tran Le Minh[2], Nguyen Thanh Trung[1]

[1]National Institute for Food Control, 65 Pham Than Duat St., Hanoi, Vietnam
[2]Hanoi Medical University, 1 Ton That Tung St., Hanoi, Vietnam

Bacillus cereus is one of the global causes of food poisoning. In this study, we isolated 10 strains of B. cereus from beef pizza samples identified as the cause of food poisoning among students at two kindergartens A and B in Vietnam in 2024.

Species identification was carried out using biochemical tests and MALDI-TOF technology; antibiotic resistance profile was constructed according to the M45 CLSI guidelines, and examined the presence of cytK, bceT, hbl (hblA, hblC, and hblD) and nhe (nheA, nheB, and nheC) toxin genes among these isolated strains. The antibiotic resistance testing results showed that isolated B. cereus strains were significantly resistant to several strong antibiotics, including penicillin (100 %), vancomycin (100 %), streptomycin (90 %), tetracycline (80 %), ampicillin (70 %), and erythomycin (70 %). In addition, 100 % of B. cereus strains (10/10) in the beef pizza sample were positive for the bceT toxin gene, 80 % of strains (8/10) were positive for the cytK toxin gene, and 60 % of strains (6/10) were positive for the nheA and nheC toxin genes, and negative for the NRPS emetic toxin gene. Our study contributes to the antibiotic resistance database for B. cereus associated with food poisoning in Vietnam and provides a valuable resource for developing reference materials aimed at the rapid diagnosis of food poisoning caused by diarrhea B. cereus type.

Keywords: *Bacillus cereus, food poisoning, antibiotic resistance, M45 CLSI, bceT, cytK, hbl, nhe.*

© Pham Ngoc Ha, Ninh Thi Hanh, Vu Khanh Van, Tran Le Minh, Nguyen Thanh Trung, 2025

Nguyen Thanh Trung – PhD, Head of Laboratory of Food Microbiology (e-mail: trungnt@nifc.gov.vn; tel.: + 84349363269; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8732-9911).

Pham Ngoc Ha – MSc, Researcher at Laboratory of Food Microbiology (e-mail: hapn0411@gmail.com; tel.: + 84963991575; ORCID: https://orcid.org/0009-0001-1248-3404).

Hanh Ninh Thi – Researcher at Laboratory of Food Microbiology (e-mail: ninhhanh891997@gmail.com; tel.: + 84338273077; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9693-3507).

Vu Khanh Van – Researcher at Laboratory of Food Microbiology (e-mail: khanhvan2180@gmail.com; tel.: + 84345096509).

Tran Le Minh – student (e-mail: minhtranle.work@gmail.com; tel.: + 84985364352).

References

1. McDowell R.H., Sands E.M., Friedman H. Bacillus Cereus. *StatPearls*. Treasure Island (FL), StatPearls Publ., 2024. Available at: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK459121/ (September 19, 2024).
2. Duan S., Yu Y., Guo Y., Lu D., Li N., Liu Z., Liang J., Jiang Y. [et al.]. Epidemiological Evaluation of *Bacillus cereus*-Induced Foodborne Outbreaks – China, 2010–2020. *China CDC Wkly*, 2023, vol. 5, no. 33, pp. 737–741. DOI: 10.46234/ccdcw2023.140
3. Bottone E.J. Bacillus cereus, a Volatile Human Pathogen. *Clin. Microbiol. Rev.*, 2010, vol. 23, no. 2, pp. 382–398. DOI: 10.1128/CMR.00073-09
4. Etikala A., Thamburaj S., Johnson A.M., Sarma C., Mummaleti G., Kalakandan S.K. Incidence, toxin gene profile, antibiotic resistance and antibacterial activity of *Allium parvum* and *Allium cepa* extracts on *Bacillus cereus* isolated from fermented millet-based food. *LWT*, 2022, vol. 160, no. 11, pp. 113314. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113314
5. Jensen L.B., Baloda S., Boye M., Aarestrup F.M. Antimicrobial resistance among Pseudomonas spp. and the Bacillus cereus group isolated from Danish agricultural soil. *Environ. Int.*, 2001, vol. 26, no. 7–8, pp. 581–587. DOI: 10.1016/s0160-4120(01)00045-9
6. Dietrich R., Jessberger N., Ehling-Schulz M., Märtlbauer E., Granum P.E. The Food Poisoning Toxins of Bacillus cereus. *Toxins (Basel)*, 2021, vol. 13, no. 2, pp. 98. DOI: 10.3390/toxins13020098
7. Ramm F., Stech M., Zemella A., Frentzel H., Kubick S. The Pore-Forming Hemolysin BL Enterotoxin from Bacillus cereus: Subunit Interactions in Cell-Free Systems. *Toxins (Basel)*, 2021, vol. 13, no. 11, pp. 807. DOI: 10.3390/toxins13110807
8. Zhao Y., Sun L. Bacillus cereus cytotoxin K triggers gasdermin D-dependent pyroptosis. *Cell Death Discov.*, 2022, vol. 8, no. 1, pp. 305. DOI: 10.1038/s41420-022-01091-5
9. Choma C., Granum P.E. The enterotoxin T (BcET) from Bacillus cereus can probably not contribute to food poisoning. *FEMS Microbiol. Lett.*, 2002, vol. 217, no. 1, pp. 115–119. DOI: 10.1111/j.1574-6968.2002.tb11464.x
10. Hansen B.M., Høiby P.E., Jensen G.B., Hendriksen N.B. The Bacillus cereus bceT enterotoxin sequence reappraised. *FEMS Microbiol. Lett.*, 2003, vol. 223, no. 1, pp. 21–24. DOI: 10.1016/S0378-1097(03)00249-0
11. Marxen S., Stark T.D., Rütschle A., Lücking G., Frenzel E., Scherer S., Ehling-Schulz M., Hofmann T. Depsipeptide Intermediates Interrogate Proposed Biosynthesis of Cereulide, the Emetic Toxin of Bacillus cereus. *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, pp. 10637. DOI: 10.1038/srep10637
12. Ehling-Schulz M., Fricker M., Scherer S. Identification of emetic toxin producing Bacillus cereus strains by a novel molecular assay. *FEMS Microbiol. Lett.*, 2004, vol. 232, no. 2, pp. 189–195. DOI: 10.1016/S0378-1097(04)00066-7
13. Cở sở dữ liệu nhiệm vụ KHCN – Đánh giá khả năng phát hiện trực tiếp gen độc tố của Bacillus Cereus trong một số thực phẩm có nguồn gốc từ gạo bằng kỹ thuật Multiplex PCR. *BỘ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ HỆ THỐNG THÔNG TIN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ*. Available at: https://sti.vista.gov.vn/tw/Pages/tai-lieu-khcn.aspx?ItemID=199450&Type_CSDL=TAILIEUKHCN&Keyword=&searchInFields... (October 08, 2024) (in Vietnamese).
14. Saeed B.M.S., Abbas B.A., Al-Jadaan S.A.N. Detection of Bacillus cereus genes responsible for diarrheal and emetic toxins. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2021, vol. 1879, no. 2, pp. 022034. DOI: 10.1088/1742-6596/1879/2/022034
15. National Advisory Committee On Microbiological Criteria For Foods. Response to Questions Posed by the Department of Defense Regarding Microbiological Criteria as Indicators of Process Control or Insanitary Conditions. *J. Food Prot.*, 2018, vol. 81, no. 1, pp. 115–141. DOI: 10.4315/0362-028X.JFP-17-294
16. Abdelaziz M.N.S., Zayda M.G., Maung A.T., El-Telbany M., Mohammadi T.N., Lwin S.Z.C., Linn K.Z., Wang C. [et al.]. Genetic Characterization, Antibiotic Resistance, and Virulence Genes Profiling of *Bacillus cereus* Strains from Various Foods in Japan. *Antibiotics (Basel)*, 2024, vol. 13, no. 8, pp. 774. DOI: 10.3390/antibiotics13080774
17. Nakayama T., Yamaguchi T., Jinnai M., Yamamoto S., Li H.T., Ngo P.T., Tran D.N.M., Nguyen O.T.H. [et al.]. Untargeted Phylogenetic Group III of Multi-drug-Resistant Bacillus cereus Isolated Using Fraser Medium from Retail Chickens in Ho Chi Minh City. *Curr. Microbiol.*, 2021, vol. 78, no. 8, pp. 3115–3123. DOI: 10.1007/s00284-021-02562-1
18. Algammal A.M., Alfifi K.J., Mabrok M., Alatawy M., Abdel-Moneam D.A., Alghamdi S., Azab M.M., Ibrahim R.A. [et al.]. Newly Emerging MDR *B. cereus* in *Mugil seheli* as the First Report Commonly Harbor *nhe, hbl, cytK*, and *pc-plc* Virulence Genes and *bla*1, *bla*2, *tetA*, and *erm*A Resistance Genes. *Infect. Drug Resist.*, 2022, vol. 15, pp. 2167–2185. DOI: 10.2147/IDR.S365254
19. Jessberger N., Dietrich R., Granum P.E., Märtlbauer E. The *Bacillus cereus* Food Infection as Multifactorial Process. *Toxins*, 2020, vol. 12, no. 11, pp. 701. DOI: 10.3390/toxins12110701
20. Bağcıoğlu M., Fricker M., Johler S., Ehling-Schulz M. Detection and Identification of *Bacillus cereus, Bacillus cytotoxicus, Bacillus thuringiensis, Bacillus mycoides* and *Bacillus weihenstephanensis* via Machine Learning Based FTIR Spectroscopy. *Front. Microbiol.*, 2019, vol. 10. DOI: 10.3389/fmicb.2019.00902

Pham Ngoc Ha, Ninh Thi Hanh, Vu Khanh Van, Tran Le Minh, Nguyen Thanh Trung. Isolation and characterization of bacillus cereus strains isolated from a beef pizza food poisoning incident in Hanoi. Health Risk Analysis, 2025, no. 2, pp. 98–106. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.08.eng

Получена: 03.12.2024
Одобрена: 25.04.2025
Принята к публикации: 14.06.2025

УДК 613.6.01: 614.3
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.09

Читать онлайн

Научная статья

САНИТАРНО-ПРОСВЕТИТЕЛЬСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД НЕСПЕЦИФИЧЕСКОЙ ПРОФИЛАКТИКИ РИСКОВ ЗАРАЖЕНИЯ ЧУМОЙ НА ТЕРРИТОРИИ ПРИРОДНОГО ОЧАГА В КОШ-АГАЧСКОМ РАЙОНЕ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ

С.В. Балахонов[1], Е.С. Куликалова[1], А.И. Мищенко[2], В.М. Корзун[1], А.В. Рогалева[1], С.М. Лященко[1], А.А. Иташев[2], С.Л. Сарикова[3], Н.Б. Калыбаева[4], Н.М. Мадинова[4]

[1]Иркутский научно-исследовательский противочумный институт Сибири и Дальнего Востока, Российская Федерация, 664047, г. Иркутск, ул. Трилиссера, 78
[2]Алтайская противочумная станция, Российская Федерация, 649002, г. Горно-Алтайск, ул. Заводская, 2
[3]Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Республике Алтай, Российская Федерация, 649002, г. Горно-Алтайск, Коммунистический просп., 173
[4]Кош-Агачская районная больница, Российская Федерация, 649780, с. Кош-Агач, ул. Медицинская, 3

Горный Алтай является территорией экологического туризма с высоким потенциалом дальнейшего развития. Вместе с тем это регион интенсивных эпизоотий чумы, регистрирующихся в том числе в непосредственной близости от населенных пунктов и стоянок скотоводов, что определяет вероятный контакт населения с носителями и переносчиками чумы. На территории сохраняется потенциальная угроза возникновения случаев заболевания человека чумой, способных привести к серьезным эпидемическим осложнениям. С 2010 по 2024 г. из полевого материала Горно-Алтайского высокогорного природного очага чумы выделено и изучено 397 штаммов чумного микроба: Yersinia pestis ssp. pestis – 182, Y. pestis ssp. central asiatica bv. altaica – 215. После выявления случаев заражения человека чумой (2014–2016 гг.) охват санитарно-просветительской работой значительно увеличился. Всего в 2016–2022 гг. прочитано 282 лекции населению, распространено более 15 тысяч экземпляров листовок и буклетов, проведено более 6630 бесед. Общее число охваченных санитарно-просветительной работой ежегодно составляет от 20 до 65 тысяч человек.

Осуществлена оценка эффективности санитарно-просветительских мероприятий по информированию людей о факторах риска проживания на территории природного очага чумы.

Метод исследования – опрос населения по специально разработанной анкете. В опросе приняли участие 1650 жителей Кош-Агачского района – эндемичной по чуме территории, в том числе 135 животноводов и членов их семей.

По результатам анкетирования выявлено, что жители Кош-Агачского района Республики Алтай (более 90 % респондентов) осведомлены о факторах риска проживания на территории природного очага, а также об источниках инфекции – носителях и переносчиках возбудителя чумы. Большинство людей, проживающих на эндемичной территории, оснащено средствами связи и имеют транспортные средства для обращения за оказанием медицинской помощи и готовы информировать медработников при проявлении или при подозрении на проявления у них или знакомых первых сигнальных признаков болезни.

Ключевые слова: *Горно-Алтайский высокогорный природный очаг чумы, анкетирование, санитарно-просветительская работа, факторы риска.*

© Балахонов С.В., Куликалова Е.С., Мищенко А.И., Корзун В.М., Рогалева А.В., Лященко С.М., Иташев А.А., Сарикова С.Л., Калыбаева Н.Б., Мадинова Н.М., 2025

Балахонов Сергей Владимирович – доктор медицинских наук, профессор, директор (e-mail: adm@chumin.irkutsk.ru; тел.: 8 (395) 222-01-35; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4201-5828).

Куликалова Елена Станиславовна – кандидат медицинских наук, заведующий отделом эпидемиологии (e-mail: adm@chumin.irkutsk.ru; тел.: 8 (395) 222-01-35; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7034-5125).

Мищенко Александр Иванович – врач эпидемиологического отдела (e-mail: chumagorny@mail.ru; тел.: 8 (388) 226-43-19).

Корзун Владимир Михайлович – доктор биологических наук, заведующий зоолого-паразитологическим отделом (e-mail: adm@chumin.irkutsk.ru; тел.: 8 (395) 222-01-35; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1947-5252).

Рогалева Анастасия Викторовна – младший научный сотрудник отдела эпидемиологии (e-mail: nastyarogaleva77@gmail.com; тел.: 8 (914) 923-80-90; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3951-714X).

Лященко Семён Максимович – врач отдела эпидемиологии (e-mail: adm@chumin.irkutsk.ru; тел.: 8 (395) 222-01-35; ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9778-3485).

Иташев Аржан Аликович – заместитель директора по эпидемиологической работе (e-mail: chumagorny@mail.ru; тел.: 8 (388) 226-43-19; ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1183-9728).

Сарикова Светлана Леонидовна – заместитель руководителя (e-mail: Tagizova_SL@04.rospotrebnadzor.ru; тел.: 8 (923) 664-62-72).

Калыбаева Наталия Борисовна – главный врач (e-mail: kosh-agach@med04.ru; тел.: 8 (388) 422-26-55).

Мадинова Наталья Муратовна – заведующий инфекционным отделением (e-mail: kosh-agach@med04.ru; тел.: 8 (388) 422-26-55).

Трансграничный Сайлюгемский природный очаг чумы находится на северной окраине обширной Центрально-Азиатской зоны природной очаговости этой инфекции и располагается на территории двух государств – России и Монголии. Российская, северная его часть (Горно-Алтайский высокогорный природный очаг), занимает Юго-Восточную область Горного Алтая и административно относится к территории Кош-Агачского района Республики Алтай [1]. Растущая привлекательность Горного Алтая как зоны экологического туризма определяет высокую посещаемость территории российскими и иностранными гражданами. При этом эндемичность территории и непосредственная близость потенциальных очагов зоонозной чумы к населенным пунктам и скотоводческим стоянкам, а также к основным транспортным магистралям с высокой долей трансграничных перевозок создают условия для тесного контакта населения с носителями и переносчиками чумы.

Значительная часть Кош-Агачского района Республики Алтай на протяжении длительного времени (с начала 1990-х гг.) характеризуется высокой эпизоотической активностью по чуме [2]. Все три случая заболевания людей (2014–2016 гг.) связаны с охотой и употреблением в пищу мяса сурков [3–6]. Для жителей Алтая сурочье мясо является традиционным деликатесом, нередко подается в качестве подарка уважаемым гостям, что может являться причиной заражения. Так, при проведении эпидемиологического расследования при эпидемическом осложнении в 2014 г. в холодильнике заболевшего чумой А. в с. Мухор-Тархата обнаружены три тушки сурков, одна из которых была заражена чумой. Эти сурки были специально добыты и хранились для праздничного застолья. В 2015 г. две тушки сурков (из обеих при микробиологическом исследовании выделены штаммы чумного микроба основного подвида), изъятые из морозильной камеры в доме заболевшего М. в с. Кызыл-Таш, предназначались для новогоднего праздника [3]. Таким образом, создается риск развития эпидемических осложнений по чуме в нетипичный для этого заболевания сезон года и распространения возбудителя далеко за пределы энзоотичной по чуме территории, где источником инфекции может служить контаминированное чумным микробом мясо сурка [3–6].

Сохраняющаяся высокая эпизоотическая активность Горно-Алтайского высокогорного природного очага чумы обусловливает его наибольшую эпидемическую значимость на территории России. Здесь с 2010 по 2024 г. из полевого материала выделено и изучено 397 штаммов чумного микроба: *Yersinia pestis* ssp. *pestis* – 182, *Y. pestis* ssp. *central asiatica* bv. *altaica* – 215.

В условиях высокой эпизоотической активности природного очага чумы важным разделом превентивных мероприятий, наряду с иммунопрофилактикой инфекции и заблаговременными дезинсекционными мероприятиями, является разъяснительная и санитарно-просветительская работа с населением по информированию его о факторах риска при проживании и ведении хозяйственной и другой деятельности на энзоотичной по чуме территории. Данная работа проводится согласно «Комплексному плану мероприятий учреждений Роспотребнадзора по оздоровлению Горно-Алтайского высокогорного природного очага чумы в Кош-Агачском районе Республики Алтай», ежегодно пролонгируемого и утверждаемого Руководителем Роспотребнадзора. Основные мероприятия по профилактике чумы, которые были проведены при локализации и ликвидации случаев чумы, а также действия, выполняемые на ежегодной основе, описаны в работах 2018 г. [7, 8]. При этом представляется крайне важным иметь обратную связь, которая могла бы являться основанием для совершенствования профилактической, в том числе информационно-просветительской, работы с населением. Применение медицинских исследовательских анкет для опросов – один из инструментов получения такой обратной связи. Опросы позволяют охватить максимальный объем респондентов и получать репрезентативные по объему выборки для применения проверенных статистических моделей [9, 10].

Цель исследования – оценить эффективность санитарно-просветительских мероприятий по информированию людей о факторах риска проживания на территории природного очага чумы.

Материалы и методы. В исследовании были использованы анкеты, разработанные специалистами Роспотребнадзора в 2017 г. и актуализированные в 2024 г. Анкеты состояли из трех блоков: общие сведения (9 вопросов), социально-бытовые условия жизни (12 вопросов), формы контакта населения с природным очагом (21 вопрос). В опросе приняли участие лица, находящиеся в условиях высокого риска инфицирования чумой, – жители эндемичной по чуме территории, расположенной в Кош-Агачского районе. Сотрудники Алтайской противочумной станции распространили анкеты в фельдшерско-акушерские пункты. Респондентам нужно было дать как развернутые ответы, так и выбрать наиболее подходящие варианты. Все 132 анкеты с ответами скотоводов и членов их семей, проживающих на летних стоянках, внесены в базу данных на платформе программного продукта Microsoft Excel. Анализ результатов анкетирования проведен общепринятыми методами вариационной статистики с помощью расчета экстенсивного показателя и 95%-ных доверительных интервалов (ДИ)[1]:

$$CL = \overline{x} \pm Z \cdot \frac{S}{\sqrt{n}},$$

[1] Рокицкий П.Ф. Биологическая статистика. – 3-е изд., испр. – Минск: Вышэйш. школа, 1973. – 320 с.; Гланц С. Медико-биологическая статистика: пер. с англ. – М.: Практика, 1998. – 459 с.

где CL – доверительный интервал;

$\bar{x}$ – выборочное среднее;

Z – значение доверительного уровня для вычисления 95%-ной вероятности = 1,96;

S – среднеквадратическое отклонение выборки;

N – размер выборки.

На основе полученных результатов сделаны выводы об эффективности санитарно-просветительской работы на территории природного очага чумы и подготовлены рекомендации.

Результаты и их обсуждение. Высокая эпизоотическая активность природного очага чумы в Кош-Агачском районе обосновывает высокую значимость информирования населения о факторах риска заболевания чумой. Всего в 2016–2022 гг. прочитано 282 лекции населению (ежегодно в среднем 40 лекций), распространено 15 263 экз. листовок и буклетов, проведено более 6630 бесед. Общее число охваченных санитарно-просветительной работой ежегодно составляет от 20 тысяч человек в 2016–2020 гг. до 64 580 человек в 2022 г. [1]. Эффективность проведенной в 2016–2017 гг. работы подтверждена результатами опроса, проведенного эпидгруппой с июня по сентябрь 2017 г. среди местного населения. Всего было опрошено 1650 человек – жителей Кош-Агачского района. В ходе анкетирования установлено, что население знает об опасности заражения чумой в регионе и основных признаках заболевания, положительно относится к вакцинации, проведению дезинсекции и дератизации. Большинство опрошенных (91 %) осведомлены о роли сурков в заражении человека чумой. О значении блох как переносчиков возбудителя знают 77 % опрошенных, о запрете охоты на сурков известно 89 % людей, но лишь 61 % готовы сотрудничать с правоохранительными органами по пресечению браконьерского промысла серого (алтайского) сурка. Эти данные свидетельствуют о необходимости усиления санитарно-просветительной работы с людьми по вопросам ответственности за нарушение запрета и ограничений на охоту и проведение профилактических мероприятий [1].

За 2024 г. на территории высокогорного Горно-Алтайского природного очага чумы было прочитано 17 лекций, проконсультировано по методам профилактики чумы 730 медицинских и 57 ветеринарных работников, а также 816 медработников присутствовали на семинарах по клиническим проявлениям и профилактике чумы. В общей сложности всеми видами санитарно-гигиенического обучения по чуме было охвачено 18 966 жителей региона.

Скрининговая группа ответивших респондентов в 2024 г. состояла из мужчин и женщин примерно в равном количестве (мужчины – 54,1 %, женщины – 45,9 %) (рис. 1).

Стоит отметить, что в анкетах не все респонденты отвечали на каждый вопрос, поэтому не везде сумма ответивших равна ста процентам. На территории природного очага чумы в населенных пунктах и на стоянках проживают лица в возрасте 30–49 лет – 37,1 %, 50–64 лет – 27,2 %, старше 65 лет – 3,0 %, наименьшая группа состоит из лиц 18–29 лет – 1,5 %. Преобладающей национальностью среди опрошенных являются алтайцы – 58,3 %, казахи – 30,3 % и теленгиты – 1,5 %. Остальные 9,9 % – смешанные семьи, состоящие из лиц этих национальностей. Почти в половине случаев (43,2 %) на стоянке проживают два человека, но встречаются семьи и с большим количеством человек. У 81,1 % опрошенных нет детей или они не проживают на стоянках.

Респонденты в основном (97,7 %) отметили санитарное состояние своего жилища как среднее. Среди надворных построек многие опрошенные (88,6 %; ДИ: 83,2–94,0 %) указали наличие кошары. Большинство интервьюированных (82,6 %; ДИ: 76,1–89,1 %) упомянули отсутствие грызунов, блох, клещей и вшей в своих жилищах. Ответившие преимущественно оценили уровень своих гигиенических знаний как средний (68,2 %; ДИ: 60,3–76,1 %). В качестве домашних животных в основном фиксировали собак, реже – кошек. Наличие верблюдов отмечено на двух стоянках (в урочищах Ак-Кел, Бельтирский ФАП и Дзудут Жан-Аульский ФАП). Отдых в полевых условиях как способ досуга выбирают 47,0 % (ДИ: 38,5–55,5 %) ответивших.

Большинство опрошенных 65,9 % (ДИ: 57,8–74,0 %) проживает на расстоянии от 11 до 50 км до ближайших медицинских организаций, 68,9 % (ДИ: 61,0–76,8 %) респондентов обращаются за медицинской помощью один раз в месяц и чаще. Отсутствие средств связи у 16,7 % лиц (ДИ: 10,3–23,1 %),

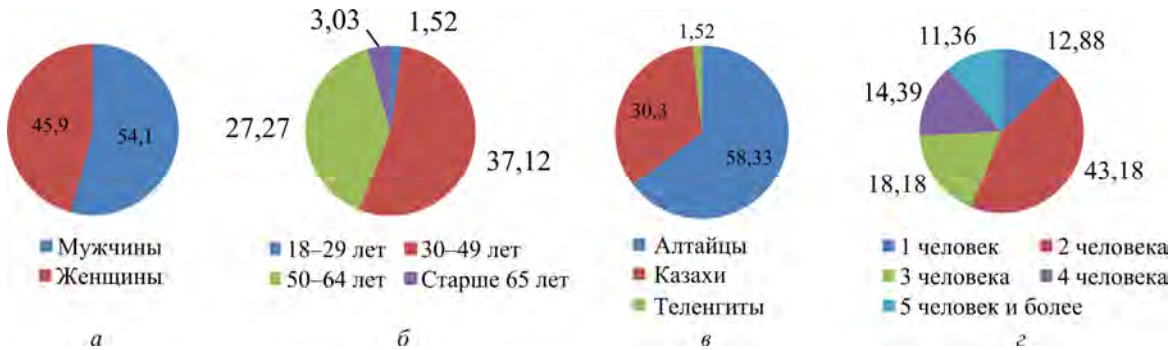


Рис. 1. Характеристика скрининговой группы респондентов (2024). Распределение по:
а – полу; *б* – возрасту; *в* – национальности; *г* – количеству человек в семье

проживающих на данной территории, может затруднять своевременное обращение за медицинской помощью при появлении сигнальных признаков чумы. Номер скорой медицинской помощи знают 56,1 % (ДИ: 47,6–64,6 %), также 25,8 % (ДИ: 18,3–33,3 %) указали личный сотовый номер медицинского работника. Фактор значительного расстояния до медицинских учреждений в определенной мере компенсируется тем, что более половины опрошенных владеют транспортными средствами в виде автомобиля, еще 15,2 % пользуются мотоциклом (ДИ: 9,1–21,3 %).

Большинство ответивших занимается выпасом скота 71,2 % (ДИ: 63,5–78,9 %), среди них 7,6 % (ДИ: 3,1–12,1 %) выбирают вольный выпас. Покосом сена занимаются 76,5 % (ДИ: 69,3–83,7 %) опрошенных: вручную – 10,6 % (ДИ: 5,3–15,9 %), на сенокосилках – 53,8 % (ДИ: 45,3–62,3 %), оба метода выбирают 12,1 % (ДИ: 6,5–17,7 %). Половина респондентов заготавливает топливо (кизяк и аргыл). Травы, ягоды и грибы собирают 35,6 % (ДИ: 27,4–43,8 %), строительными работами занимаются 3,0 % (ДИ: 0,1–5,9 %). Выполнение этих работ для 60,0 % участников опроса (ДИ: 51,6–68,4 %) связано с пребыванием на участках, на которых расположены поселения мелких млекопитающих, что повышает вероятность контакта с компонентами паразитарной системы природного очага чумы.

Почти все анкетированные лица (97,0 %; ДИ: 94,1–99,9 %) знают о введенном запрете охоты на сурков. При этом 16,7 % (ДИ: 10,3–23,1 %) отметили, что им известны факты охоты на сурков среди их родственников, друзей или знакомых. Опрошенные не отмечали фактов добывания домашними животными мертвых мелких млекопитающих, при этом трупы грызунов находили четверо (3,0 %; ДИ: 0,1–5,9 %). Более половины респондентов – 61,4 % (ДИ: 53,1–69,7 %) считают, что детей надо оградить от проживания на стоянках в летнее время. Обращает на себя внимание, что на вопрос об употреблении мяса сурка в пищу 78,0 % (ДИ: 79,4–88,8 %) ответили отрицательно, а 21,2 % (ДИ: 14,2–28,2 %) воздержались от ответа на этот вопрос, что вызывает беспокойство о реальном положении вещей. Большинство опрошенных – 72,0 % (ДИ: 64,3–79,7 %) живут в непосредственной близости (до 1 км) от поселений грызунов.

Вакцинацию против чумы считают полезной 91,0 % (ДИ: 86,1–95,9 %) опрошенных, в то время как 9,0 % (ДИ: 4,1–13,9 %) респондентов выразили негативное отношение к проведению специфической профилактики, при этом отношение к дератизации положительное у 96,2 % (ДИ: 92,9–99,5 %). Случаи заболевания с образованием воспаления в паховой, подмышечной областях в анамнезе отметили положительно 0,8 % (ДИ: 0–2,3 %), отрицательно – 80,3 % (ДИ: 73,5–87,1 %), остальные опрошенные сомневались в ответе.

В рамках проводимого в 2024 г. исследования установлено, что об основных факторах риска проживания на территории природного очага чумы, которыми являются носители основного подвида возбудителя чумы – сурки, осведомлены 98,5 % (ДИ: 96,4–100,00 %); указывают на блох в качестве переносчиков 91,7 % (ДИ: 87,0–96,4 %). При этом большинство опрошенных (75,8 %; ДИ: 68,5–83,1 %) правильно ответили, что из домашних животных может болеть чумой только верблюд. Почти все респонденты (98,5 %; ДИ: 96,4–100 %) сообщили о готовности информирования медработников при подозрении на проявление у них или у знакомых симптомов чумы (рис. 2).

Таким образом, осведомленность населения, проживающего на территории высокогорного очага чумы, находится на высоком уровне. Опрошенные проинформированы о факторах риска заражения – контактах с основными носителями и переносчиками возбудителя инфекции – на территории активного



Рис. 2. Удельный вес осведомленности населения о факторах риска инфицирования чумой на территории Горно-Алтайского высокогорного природного очага чумы и клинических проявлениях заболевания

природного очага чумы. Большинство людей, проживающих на эндемичной по чуме территории, оснащено средствами связи и имеют транспортные средства для обращения за оказанием медицинской помощи при появлении первых сигнальных признаков болезни.

Выводы. В результате проведения комплекса мер, в том числе санитарно-просветительской работы, удалось не допустить возникновения эпидемических осложнений по чуме после 2016 г. Учитывая высокую эпизоотическую активность, сохраняется актуальность дальнейшего планирования и проведения силами учреждений Роспотребнадзора и медицинских служб Республики Алтай во взаимодействии с администрацией и другими ведомствами республики (МВД, СМИ, службой ветеринарии) разъяснительной и санитарно-просветительской работы о факторах риска для здоровья населения, постоянно и / или временно проживающего и ведущего хозяйственную деятельность на территории природного очага чумы.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Трансграничный Сайлюгемский природный очаг чумы: монография / под ред. С.В. Балахонова, В.М. Корзуна. – Новосибирск, 2022. – 248 с.

2. Горно-Алтайский природный очаг чумы: Ретроспективный анализ, эпизоотологический мониторинг, современное состояние: монография / С.В. Балахонов, В.М. Корзун, Е.В. Чипанин, М.В. Афанасьев, Е.П. Михайлов, А.В. Денисов, Л.А. Фомина, И.И. Ешелкин [и др.]; под ред. С.В. Балахонова, В.М. Корзуна. – Новосибирск: Наука-Центр, 2014. – 272 с.

3. Случай заболевания человека чумой в Кош-Агачском районе Республики Алтай в 2015 г. Сообщение 1. Клинико-эпидемиологические и эпизоотологические аспекты / С.В. Балахонов, А.Ю. Попова, А.И. Мищенко, Е.П. Михайлов, Е.Б. Ежлова, Ю.В. Демина, А.В. Денисов, Е.Н. Рождественский [и др.] // Проблемы особо опасных инфекций. – 2016. – № 1. – С. 55–60. DOI: 10.21055/0370-1069-2016-1-55-60

4. Актуальные аспекты обеспечения эпидемиологического благополучия по чуме населения Республики Алтай / С.В. Балахонов, В.М. Корзун, С.А. Косилко, Е.П. Михайлов, Л.В. Щучинов, А.И. Мищенко, И.В. Зарубин, Е.Н. Рождественский, А.В. Денисов // Эпидемиология и вакцинопрофилактика. – 2016. – Т. 15, № 4. – С. 42–48. DOI: 10.31631/2073-3046-2016-15-4-42-48

5. Особенности эпизоотической и эпидемической активности Горно-Алтайского природного очага чумы в 2012–2016 годах / В.М. Корзун, С.В. Балахонов, С.А. Косилко, Е.П. Михайлов, А.И. Мищенко, А.В. Денисов, Е.Н. Рождественский, Е.В. Чипанин [и др.] // Эпидемиология и вакцинопрофилактика. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 36–38. DOI: 10.31631/2073-3046-2017-16-1-36-38

6. Заболевание человека чумой в Горно-Алтайском высокогорном природном очаге в 2014 г. Сообщение 1. Эпидемиологические и эпизоотологические особенности проявлений чумы в Горно-Алтайском высокогорном (Сайлюгемском) природном очаге чумы / В.В. Кутырев, А.Ю. Попова, Е.Б. Ежлова, Ю.В. Демина, Н.Д. Пакскина, Л.В. Щучинов, Е.П. Михайлов, А.И. Мищенко [и др.] // Проблемы особо опасных инфекций. – 2014. – № 4. – С. 9–16. DOI: 10.21055/0370-1069-2014-4-9-16

7. Организация профилактических, противоэпидемических мероприятий в целях снижения риска осложнения эпидемиологической ситуации по чуме на территории Республики Алтай / С.В. Балахонов, Л.В. Щучинов, А.И. Мищенко, А.Н. Матросов, А.В. Денисов, Е.Н. Рождественский, В.М. Корзун, С.А. Косилко [и др.] // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. – 2018. – № 6. – С. 85–94.

8. Организация противоэпидемических и профилактических мероприятий по чуме на территории Кош-Агачского района Республики Алтай и оценка их эффективности / А.Ю. Попова, С.В. Балахонов, Л.В. Щучинов, А.Н. Матросов, Е.П. Михайлов, А.И. Мищенко, А.В. Денисов, В.В. Шефер [и др.] // Инфекционные болезни. – 2018. – Т. 16, № 4. – С. 5–15. DOI: 10.20953/1729-9225-2018-4-5-15

9. Jones T.L., Baxter M.A.J., Khanduja V. A quick guide to survey research // Ann. R. Coll. Surg. Engl. – 2013. – Vol. 95, № 1. – P. 5–7. DOI: 10.1308/003588413X13511609956372

10. Alderman A.K., Salem B. Survey research // Plast. Reconstr. Surg. – 2010. – Vol. 126, № 4. – P. 1381–1389. DOI: 10.1097/PRS.0b013e3181ea44f9

Санитарно-просветительские мероприятия как эффективный метод неспецифической профилактики рисков заражения чумой на территории природного очага в Кош-Агачском районе Республики Алтай / С.В. Балахонов, Е.С. Куликалова, А.И. Мищенко, В.М. Корзун, А.В. Рогалева, С.М. Лященко, А.А. Иташев, С.Л. Сарикова, Н.Б. Калыбаева, Н.М. Мадинова // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 2. – С. 107–113. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.09

UDC 613.6.01: 614.3
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.09.eng

Read online

Research article

SANITARY-EDUCATIONAL ACTIVITIES AS AN EFFECTIVE METHOD OF NONSPECIFIC PLAGUE PREVENTION IN THE NATURAL PLAGUE FOCUS IN THE KOSH-AGACH DISTRICT OF THE REPUBLIC OF ALTAI

S.V. Balakhonov[1], E.S. Kulikova[1], A.I. Mishchenko[2], V.M. Korzun[1], A.V. Rogaleva[1], S.M. Lyashenko[1], A.A. Itashev[2], S.L. Sarikova[3], N.B. Kalybayeva[4]

[1] Irkutsk Anti-Plague Research Institute, 78 Trilissera St., Irkutsk, 664047, Russian Federation
[2]Altai Anti-plague Station, 2 Zavodskaya, Gorno-Altaisk, 649002, Russian Federation
[3] Federal Service for Surveillance over Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Altai Republic Regional Office, 173 Kommunisticheskii Av., Gorno-Altaisk, 649002, Russian Federation
[4]Kosh-Agach district hospital, 3 Meditsinskaya, Kosh-Agach, 649780, Republic of Altai, Russian Federation

The Altai Mountains are an area of ecological tourism with high potential for further development. At the same time, intensive epizootics of plague are typical for the region including those registered in close proximity to settlements and shepherds' camps raising likelihood of potential contacts between people and plague vectors and carriers. Potential hazard of plague cases among the population persists in this area and this can result in serious epidemiological complications. From 2010 to 2024, 397 plague microbe strains, 182 Yersinia pestis ssp. pestis and 215 Y. pestis ssp. central asiatica bv. Altaica, were isolated and investigated in the Gorno-Altaisk high-mountain natural plague focus. After cases of the infection were identified in humans (2014–2016), the coverage of the sanitary-educational work increased considerably. Overall, 282 lectures were delivered to the population, more than 15 thousand leaflets and booklets were handed out, and more than 6630 talks were organized over 2016–2022. Annually, sanitary-educational activities are organized for an audience between 20 and 63 thousand people.

The aim of this study was to assess effectiveness of sanitary-educational activities aimed at informing people about risk factors associated with living in a natural plague focus.

The study method was a survey conducted among the regional population using a specifically designed questionnaire. Totally, 1650 residents of the Kosh-Agach districts, including 135 shepherds and their family members, took part in the survey; the district was selected as a plague-endemic area.

According to the survey results, people from the Kosh-Agach district of the Altai Republic (more than 90 % of the respondents) were established to be well aware about risk factors associated with living in a natural plague focus as well as the infection sources, namely, plague vectors and carriers. Most people who lived in this endemic area had means of communication and transportation necessary for applying for medical aid and were ready to inform healthcare workers in case plague was suspected or the first plague signs were manifested in them or their friends or acquaintances

Keywords: *Gorno-Altaisk high-mountain natural plague focus, survey, sanitary-educational work, risk factors.*

© Balakhonov S.V., Kulikova E.S., Mishchenko A.I., Korzun V.M., Rogaleva A.V., Lyashenko S.M., Itashev A.A., Sarikova S.L., Kalybayeva N.B., 2025

Sergey V. Balakhonov – Doctor of Medical Sciences, Professor, director (e-mail: adm@chumin.irkutsk.ru; tel.: +7 (395) 222-01-35; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4201-5828).

Elena S. Kulikalova – Candidate of Medical Sciences, Head of the Department of Epidemiology (e-mail: adm@chumin.irkutsk.ru; tel.: +7 (395) 222-01-35; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7034-5125).

Aleksandr I. Mishchenko – doctor of Epidemiology Department (e-mail: chumagorny@mail.ru; tel.: +7 (388) 226-43-19).

Vladimir M. Korzun – Doctor of Biological Sciences, Head of Zoological and Parasitological Department (e-mail: adm@chumin.irkutsk.ru; tel.: +7 (395) 222-01-35; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1947-5252).

Anastasiya V. Rogaleva – Junior Researcher of the Department of Epidemiology (e-mail: nastyarogaleva77@gmail.com; tel.: +7 (914) 923-80-90; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3951-714X).

Semyon M. Lyashchenko – doctor of the Department of Epidemiology (e-mail: adm@chumin.irkutsk.ru; tel.: +7 (395) 222-01-35; ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9778-3485).

Arzhan A. Itashev – Deputy Director for Epidemiological Work (e-mail: chumagorny@mail.ru; tel.: +7 (388) 226-43-19; ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1183-9728).

Svetlana L. Sarikova – Deputy Head (e-mail: Tagizova_SL@04.rospotrebnadzor.ru; tel.: +7 (923) 664-62-72).

Nataliya B. Kalybaeva – chief physician (e-mail: kosh-agach@med04.ru; tel.: +7 (388) 422-26-55).

Natal'ya M. Madinova – Head of the Infectious Diseases Department (e-mail: kosh-agach@med04.ru; tel.: +7 (388) 422-26-55).

References

1. Transgranichnyi Sailyugemskii prirodnyi ochag chumy [Transborder Sailugem natural plague focus]. In: S.V. Balakhonov, V.M. Korzun eds. Novosibirsk, 2022, 248 p. (in Russian).

2. Balakhonov S.V., Korzun V.M., Chipanin E.V., Afanasev M.V., Mikhailov E.P., Denisov A.V., Fomina L.A., Eshelkin I.I. [et al.]. Mountain-Altai natural plague focus: retrospective analysis, epizootological monitoring, current state. In: S.V. Balakhonov, V.M. Korzun eds. Novosibirsk, Nauka-Tsentr Publ., 2014, 272 p. (in Russian).

3. Balakhonov S.V., Popova A.Yu., Mishchenko A.I., Mikhailov E.P., Ezhlova E.B., Demina Yu.V., Denisov A.V., Rozhdestvensky E.N. [et al.]. A Case of Human Infection with Plague in the Kosh-Agach Region of the Republic of Altai in 2015. Communication 1. Clinical-Epidemiological and Epizootiological Aspects. *Problemy osobo opasnykh infektsii*, 2016, no. 1, pp. 55–60. DOI: 10.21055/0370-1069-2016-1-55-60 (in Russian).

4. Balakhonov S.V., Korzun V.M., Kosilko S.A., Mikhailov E.P., Shchuchinov L.V., Mishchenko A.I., Zarubin I.V., Rozhdestvensky E.N., Denisov A.V. Actual Aspects of Epidemiological Well-Being Support Anti-Plague for Population in Altai Republic. *Epidemiologiya i vaktsinoprofilaktika*, 2016, vol. 15, no. 4, pp. 42–48. DOI: 10.31631/2073-3046-2016-15-4-42-48 (in Russian).

5. Korzun V.M., Balakhonov S.V., Kosilko S.A., Mikhailov E.P., Mishchenko A.I., Denisov A.V., Rozhdestvensky E.N., Chipanin E.V. [et al.]. Gorno-Altai Natural Plague Focus Epizootical and Epidemical Activity in 2012–2016. *Epidemiologiya i vaktsinoprofilaktika*, 2017, vol. 16, no. 1, pp. 36–38. DOI: 10.31631/2073-3046-2017-16-1-36-38 (in Russian).

6. Kutyrev V.V., Popova A.Yu., Ezhlova E.B., Demina Yu.V., Pakskina N.D., Shchuchinov L.V., Mikhailov E.P., Mishchenko A.I. [et al.]. Infection of an Individual with Plague in the Gorno-Altaisk High-Mountain Natural Focus in 2014. Communication 1. Epidemiological and Epizootiological Peculiarities of Plague Manifestations in the Gorno-Altaisk High-Mountain (Sailyugemsky) Natural Plague Focus. *Problemy osobo opasnykh infektsii*, 2014, no. 4, pp. 9–16. DOI: 10.21055/0370-1069-2014-4-9-16 (in Russian).

7. Balakhonov S.V., Schuchinov L.V., Mischenko A.I., Matrosov A.N., Denisov A.V., Rozhdestvensky E.N., Korzun V.M., Kosilko S.A. [et al.]. Organization of preventive, anti-epidemic actions to decrease risks of epidemic situation complications for plague in Republic Altai. *Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii i immunobiologii*, 2018, no. 6, pp. 85–94 (in Russian).

8. Popova A.Yu., Balakhonov S.V., Shchuchinov L.V., Matrosov A.N., Mikhaylov E.P., Mishchenko A.I., Denisov A.V., Shefer V.V. [et al.]. Organization of plague control and prevention measures on the territory of Kosh-Agach district of the Altai Republic and estimation of their effectiveness. *Infektsionnye bolezni*, 2018, vol. 16, no. 4, pp. 5–15. DOI: 10.20953/1729-9225-2018-4-5-15 (in Russian)

9. Jones T.L., Baxter M.A.J., Khanduja V. A quick guide to survey research. *Ann. R. Coll. Surg. Engl.*, 2013, vol. 95, no. 1, pp. 5–7. DOI: 10.1308/003588413X13511609956372

10. Alderman A.K., Salem B. Survey research. *Plast. Reconstr. Surg.*, 2010, vol. 126, no. 4, pp. 1381–1389. DOI: 10.1097/PRS.0b013e3181ea44f9

Balakhonov S.V., Kulikova E.S., Mishchenko A.I., Korzun V.M., Rogaleva A.V., Lyashenko S.M., Itashev A.A., Sarikova S.L., Kalybayeva N.B. Sanitary-educational activities as an effective method of nonspecific plague prevention in the natural plague focus in the Kosh-Agach district of the Republic of Altai. Health Risk Analysis, 2025, no. 2, pp. 107–113. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.09.eng

Получена: 27.01.2025
Одобрена: 17.04.2025
Принята к публикации: 14.06.2025

МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ РИСКА

УДК 613.6.02
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.10

Читать онлайн

Научная статья

К ОЦЕНКЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО РИСКА ДОЗОЗАВИСИМЫХ ЭФФЕКТОВ ГЕПАТОТОКСИЧНОСТИ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА СЕЛЕНА

М.П. Сутункова[1,2], И.А. Минигалиева[1], В.Г. Панов[1,3], Т.В. Махорина[1], М.С. Унесихина[1], И.Г. Шеломенцев[1], Р.Р. Сахаутдинова[1]

[1]Екатеринбургский медицинский – научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий, Российская Федерация, 620014, г. Екатеринбург, ул. Попова, 30
[2]Уральский государственный медицинский университет, Российская Федерация, 620028, г. Екатеринбург, ул. Репина, 2
[3]Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Российская Федерация, 620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20

Наночастицы селена (НЧ Se) нашли широкое применение во многих отраслях хозяйственной деятельности человека. В связи с этим необходимо прогнозировать и оценивать возникающие потенциальные риски здоровью. Нанотоксиканты могут оказывать воздействие на организм, вызывая негативные эффекты, имеющие нелинейную зависимость проявляющихся эффектов от дозы токсического вещества. Не выработано единого мнения о LD_{50} НЧ Se. В исследованиях, посвященных изучению дозозависимой реакции печени на различные экспозиции наночастиц селена, присутствуют противоречивые данные.

Изучены и описаны потенциально опасные для здоровья дозозависимые эффекты в печени под воздействием наночастиц оксида селена в субхроническом эксперименте с применением математических моделей.

Экспозиция моделировалась на крысах-самцах в возрасте 3–4 месяцев по 12 животных в каждой группе. Для изучения зависимости «доза – ответная реакция» использовано три уровня доз наночастиц оксида селена, и суммарная доза воздействия на массу тела в течение всего периода субхронической экспозиции составила 3,6, 18 и 36 мг/кг. Исследование было одобрено локальным этическим комитетом ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (протокол № 2 от 20.04.2021).

Выявлена нетипичная дозоответная зависимость изменений в печени от нанооксида селена. Наблюдались выраженные изменения в митохондриях клеток печени, нарушенный баланс ферментов крови и клеточного состава печени, что может указывать на повреждение органа и нарушение секреторных функций под действием низких и средних концентраций наночастиц оксида селена.

Полученные данные могут быть использованы в рамках определения стандартов химической безопасности наночастиц оксида селена и в оценке риска здоровью.

Ключевые слова: *наночастицы, in vivo, доза – эффект, оксид селена, гепатотоксичность, клетки Купфера, гепатоциты, риск здоровью.*

© Сутункова М.П., Минигалиева И.А., Панов В.Г., Махорина Т.В., Унесихина М.С., Шеломенцев И.Г., Сахаутдинова Р.Р., 2025

Сутункова Марина Петровна – доктор медицинских наук, директор; заведующий кафедрой гигиены и медицины труда (e-mail: sutunkova@ymrc.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1743-7642).

Минигалиева Ильзира Амировна – доктор биологических наук, заведующий отделом токсикологии и биопрофилактики (e-mail: ilzira@ymrc.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0097-7845).

Панов Владимир Григорьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела токсикологии и биопрофилактики; доцент кафедры математического анализа и теории функций (e-mail: panov.wlad1mir@yandex.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6718-3217).

Махорина Татьяна Владимировна – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник лаборатории научных основ биопрофилактики (e-mail: lisa430@yandex.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6126-9706).

Унесихина Мария Сергеевна – младший научный сотрудник отдела молекулярной биологии и электронной микроскопии (e-mail: unesihinams@ymrc.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5576-365X).

Шеломенцев Иван Глебович – научный сотрудник отдела молекулярной биологии и электронной микроскопии (e-mail: shelomencev@ymrc.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8795-8777).

Сахаутдинова Рената Рашидовна – кандидат медицинских наук, заведующий ДЛО НПО «Лабораторно-диагностических технологий» (e-mail: sahautdinova@ymrc.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2726-9259).

Образование наночастиц селена (НЧ Se) является следствием хозяйственной деятельности человека: в металлургической, химической промышленности [1], изготовлении керамики, стекла, электроники. Использование НЧ Se для обогащения продуктов питания и пищевых добавок [2], в качестве средств доставки лекарств [3], антибактериальных и противораковых препаратов [4–7], а также для профилактики заболеваний у сельскохозяйственных животных [8, 9] и при выращивании растений может подвергать риску развития заболеваний, связанных с избыточным накоплением соединений селена в организме, не только у работников вредных производств, но и населения. Анализируя эффекты биологической активности наноразмерного селена, необходимо учитывать токсическую составляющую НЧ, определяемую физическими свойствами и специфическими характеристиками НЧ-образующего химического элемента. В зависимости от дозы и времени экспозиции НЧ Se проявляют про- или антиоксидантную активность [4, 5, 10]. Экспериментально доказано, что более мелкие НЧ Se (6,8 нм) обладают большей проникающей способностью и накоплением в органах, большей активностью в замещении серы в серосодержащих белках, участвуя в синтезе селенпротеинов [4, 11]. Преодоление гематоэнцефалического барьера мелкими НЧ Se (6,8 нм) приводит к уменьшению количества астроглиальных клеток [4], в то время как более крупные НЧ Se проявляют нейропротекторные свойства, увеличивая количество нейронов [10]. Известны негативные токсические проявления НЧ Se. В результате 28 дней перорального введения крысам НЧ Se 0,5 мг/кг м.т. в день развивается локальная алопеция, снижается прирост массы тела, увеличивается относительная масса печени [12]. Интенсивнее, чем у взрослых, накопление НЧ Se происходит у молодых особей, преимущественно в печени, почках, яичках [13]. НЧ Se накапливаются в печени [4, 14, 15], почках [4, 15], мышцах, желудке, в крови [15]. НЧ Se потенциально токсичны для репродуктивной системы [16]. Одним из ключевых органов-мишеней для НЧ Se является печень. При участии печени происходит преобразование НЧ Se в селеноцистеин и селенометионин и включение в состав ферментов [17]. В результате прооксидантной [18] и антиоксидантной активности НЧ Se [19] происходит биоаккумуляция продуктов перекисного окисления липидов в печени [15]. Результаты дозозависимого воздействия НЧ Se на печень представляются противоречивыми: неоднозначно изменяются функциональная активность и гистологическая картина печени. В одних случаях активность в крови аланинаминотрансферазы (АЛТ) и аспартатаминотрансферазы (АСТ), альбумина сохранялась без изменений: в 90-дневном эксперименте на рыбах при дозе 0,25, 0,5 и 1 мг НЧ Se/кг рациона [9]. Не наблюдалось отличий в активности АСТ и щелочной фосфатазы (ЩФ) при поступлении в течение 28 дней НЧ Se, содержащей 0,5, 1,5, 3,0 и 5,0 мг Se/кг с едой у крыс, выявлено значительное снижение активности АЛТ по сравнению с контрольной группой во всех экспонированных группах и снижение активности супероксиддисмутазы в печени в группе, получавшей НЧ Se при 5 мг Se/кг (929 ± 103 ед/мл) [14]. В ряде работ отмечено аналогичное изолированное снижение АЛТ или в комбинации с АСТ [20, 22]. Повышение трансаминаз было отмечено в 28-дневных экспериментах на мышах при введении НЧ Se (70–90 нм) перорально 1; 4 мг/кг [23] и через зонд в дозе 1/10–1/5 LD_{50} (LD_{50} 88,76 Se мг/кг) [24]. Сообщения о повышении трансаминаз [16, 25] и повышении активности ЩФ [15] под воздействием НЧ Se получены в более ранних работах.

Дозозависимое состояние паренхимы печени наблюдалось при гистопатологическом исследовании от отсутствия [12] или легких дистрофических изменений в группах крыс, получавших 28 дней НЧ Se 0,5–3,0 мг Se/кг [14] и в течение 14 дней 2,0; 4,0 мг/кг м.т [16], до легких мультифокальных аутолитических повреждений с признаками застоя в группе, получавшей НЧ Se с 5,0 мг Se/кг [14], и разрушения гепатоцитов [16].

Разная степень токсичности неодинакова для разных наноразмерных соединений селена [26], по этой причине могут наблюдаться экспериментальные различия в показателях прироста массы тела, активности печеночных и селензависимых ферментов, изменений антиоксидантной системы организма и выраженности гистологических повреждений. По-прежнему остается открытым вопрос о полулетальной дозе НЧ Se, что может быть обусловлено выбором различных биологических объектов для исследований (рыбы, индюки, мыши, крысы). Но даже для животных одного вида нет четких показателей LD_{50}: для мышей диапазон находится от 61,6 мг Se/кг LD_{50} линии ICR, SPF [27] до 2000 мг/кг [4].

Цель исследования – изучение и описание потенциально опасных для здоровья дозозависимых эффектов в печени под воздействием наночастиц оксида селена в субхроническом эксперименте с применением математических моделей.

Материалы и методы. ***Характеристика наночастиц и суспензии.*** Наночастицы оксида селена (НЧ SeO) в форме суспензии на водной основе получены в центре коллективного пользования Уральского федерального университета им. Б.Н. Ельцина. Методом сканирующей электронной микроскопии определены: близкая к сферической форма и диаметр НЧ SeO 37–65 нм (рис. 1). Концентрация наночастиц в суспензии подтверждена при высоком дзета-потенциале до 42 мВ на анализаторе размеров Zetasizer Nano ZS (Malvern Panalytical, Великобритания) и составила 0,25 мг/мл SeO.

Лабораторные животные и экспериментальная экспозиция. Исследование проводилось на аутбредных 3–4-месячных самцах крыс с массой тела 200–270 г. Для исследований были сформированы

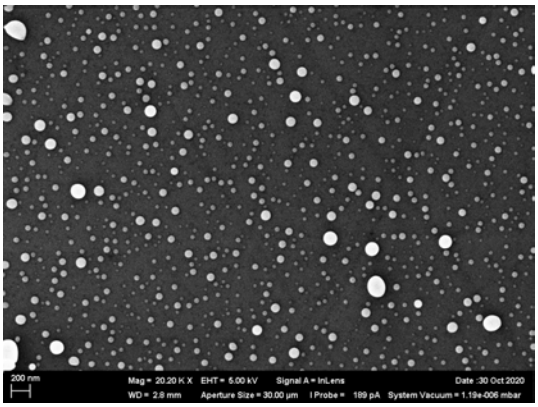


Рис. 1. НЧ SeO в суспензии (сканирующая электронная микроскопия, увеличение × 20 200)

три экспериментальные группы с различной суммарной дозой воздействия НЧ SeO и одна контрольная группа по 12 животных в каждой. Субхроническая экспозиция моделировалась на протяжении шести недель последовательными внутрибрюшинными инъекциями стабильной суспензии НЧ SeO 3 раза в неделю. Группе «НЧ SeO 3,6» экспонировали суммарную дозу 3,6 мг/кг НЧ SeO, группе «НЧ SeO 18» – 18 мг/кг НЧ SeO, группе «НЧ SeO 36» – 36 мг/кг НЧ SeO, группе «Контроль» – деионизированную воду. Поскольку о LD_{50} НЧ селена нет единого мнения, подбор доз и способа введения проведен в предварительном эксперименте с учетом использования химически чистых НЧ SeO для получения суспензии аналогично ранее проведенным нами работам [28]. Полученные результаты сопоставимы с данными других исследовательских групп [21, 25].

Ограничением исследования послужило использование животных одного вида и пола.

Работа согласована с локальным этическим комитетом ФБУН «Екатеринбургский медицинский – научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий», протокол № 2 от 20.04.2021.

По окончании эксперимента проводился биохимический анализ сыворотки крови на анализаторе Cobas Integra 400 plus Roche (Швейцария) с применением готовых диагностических наборов для определения трансаминаз и ЩФ.

Морфологические исследования клеток и ткани печени. С целью выявления морфологических изменений печени во всех группах животных по окончании эксперимента были проведены исследования цитологических препаратов. Мазки-отпечатки печени окрашивались по Лейшману. При последующей световой микроскопии при увеличении × 100 и × 1000 на микроскопе Primo Star (Carl Zeiss, Германия) с видеокамерой визуализации USCMOS на 300 клеток просчитывались процентный состав клеток и количество клеток с различными повреждениями.

Изучена гистологическая картина печени крыс в контрольной группе и группе «НЧ SeO 36», получившей максимальную испытываемую дозу 36 мг/кг НЧ SeO. Морфометрические исследования безъядерных гепатоцитов и Купферовских клеток проводили с применением сетки Автандилова.

Электронная микроскопия. С использованием режима STEM в сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Hitachi REGULUS SU8220» (Hitachi High-Technologies Corp, Япония) определялась ультраструктурная характеристика повреждения клеток согласно классификации Mei G. Sun [13]. На основании топологических характеристик внутренней мембраны митохондрий (количества крист, однородности и плотности матрикса) выделяли нормальные митохондрии (тип A) и вариант нормально-везикулярных митохондрий (тип B), а также патологические формы: везикулярные (тип C), везикулярно-вздутые (тип D), вздутые (тип E).

Математическое моделирование и статистическая обработка. На основании полученных в эксперименте общепринятых, отражающих изменение функционального состояния печени показателей построена зависимость токсических эффектов в печени от суммарной дозы НЧ SeO с использованием четырех функций:

• модифицированная функция Хилла (1), введенная в работе [29]:

$$y = \left(b_0 + \frac{b_1 + b_2 x^{b_3}}{1 + \left(b_4 x\right)^{b_5}} \right) \left(1 + b_6 x^{b_7}\right), \qquad (1)$$

где b_0, …, b_7 – параметры, определяемые методом наименьших квадратов по экспериментальным данным;

• гиперболическая функция (2), связанная с уравнением Михаэлиса – Ментен, которое используется, например, для описания скорости ферментативных реакций [15]:

$$y = \frac{b_0 + b_1 x}{b_2 + b_3 x}; \qquad (2)$$

• линейная комбинация полиномов Чебышёва (3). Полиномы Чебышёва (первого рода) определяются следующим равенством:

$$T_n\left(x\right) = \sum_{k=0}^{[n/2]} C_n^{2k} (x^2 - 1) x^{n-2k}, \qquad (3)$$

где $[n/2]$ – целая часть числа $n/2$, C_n^{2k} – число сочетаний из n по $2k$.

• модифицированная модель дозоответной зависимости Джонсон – Ловетт [29, 30]:

$$y = b_0 + \frac{b_1}{1 + b_2 e^{b_3 x}} + \frac{b_4}{1 + b_5 e^{b_6 x}}. \qquad (4)$$

Статистическая значимость межгрупповых различий средних значений всех величин оценивалась с помощью t-критерия Стьюдента ($p < 0{,}05$) и Манна – Уитни.

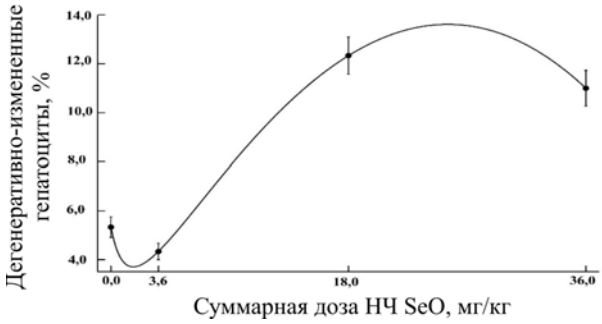


Рис. 2. Изменение содержания ДИГ в мазках-отпечатках печени под влиянием НЧ SeO (данные приведены как среднее ± ошибка среднего)

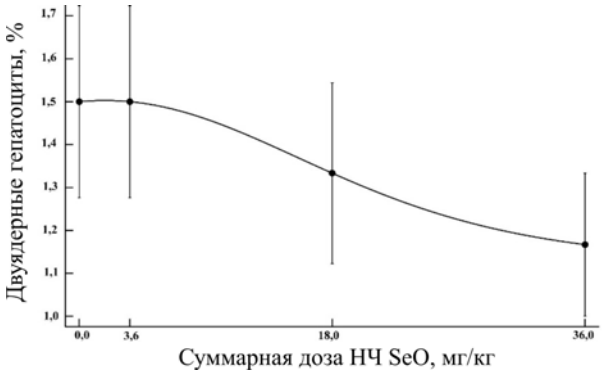


Рис. 3. Изменение содержания ДГ в мазках-отпечатках печени экспонированных животных под влиянием НЧ SeO (данные приведены как среднее ± ошибка среднего)

Результаты и их обсуждение. Анализ повреждающих эффектов НЧ SeO в печени проведен на различных структурных уровнях: субклеточном, клеточном, тканевом и органном.

Ультраструктурное исследование клеток печени электронной микроскопией выявило снижение количества митохондрий типа А и В, относимых Mei G. Sun к нормальному морфотипу [13], с 94,82 ± 0,95 % в контроле до 87,44 ± 1,14 % в группе «НЧ SeO 36» с максимальной суммарной дозой НЧ SeO 36 мг/кг ($p < 0,05$).

После воздействия на крыс НЧ SeO были обнаружены изменения на клеточном и тканевом уровне. При микроскопии в гистологических препаратах печени отмечено увеличение содержания безъядерных гепатоцитов и клеток Купфера (КК) в группе «НЧ SeO 36» ($p < 0,01$).

Одним из проявлений повреждающего эффекта под действием НЧ SeO было увеличение количества дегенеративно-измененных гепатоцитов (ДИГ) (рис. 2). Нарастание процента ДИГ под действием увеличения суммарной концентрации НЧ SeO описано графиком с использованием линейной комбинации полиномов Чебышёва (формула (3)).

В мазках-отпечатках печени при наименьшей испытуемой дозе НЧ SeO 3,6 мг/кг наблюдается незначительное снижение процента ДИГ, но при суммарной дозе НЧ SeO 18 мг/кг выявляется максимальное количество поврежденных гепатоцитов ($p < 0,05$), которое незначимо снижается при действии 36 мг/кг НЧ SeO. Подобная немонотонность ответа биологических объектов отмечена в работах других авторов [31–34].

Нелинейность графиков зависимости ДИГ от концентрации НЧ SeO объясняется токсическими повреждающими механизмами НЧ SeO в печени. При низких дозах выбранной нами экспозиции (3,6 мг/кг м.т.) НЧ SeO могут потребляться организмом для синтеза селенсодержащих ферментов – тиоредоксинредуктазы, фосфолипидгидропероксидглутатитонпероксидазы, глутатионпероксидазы [17] – и не представляют серьезной опасности. При кратном (в 5 раз) увеличении нагрузки НЧ SeO происходит повреждение митохондрий, нарушение генетического аппарата клеток, повреждение клеток продуктами окислительного стресса, ранний апоптоз [15, 35].

Одновременно с этим наблюдается снижение репаративного потенциала печени. В регенерации печени задействованы гепатоциты, составляющие более 60 % клеточной популяции печени [36], синусоидальные клетки, на 50 % представленные КК и лейкоцитами, клетки соединительной ткани и внеклеточный матрикс [37].

Способность к регенерации печени оценивалась по содержанию КК, лейкоцитов и двуядерных гепатоцитов (ДГ) в мазках-отпечатках (рис. 3–6). Полученная функция (формула (4)) для ДГ с использованием модифицированной модели Джонсон – Ловетт [30] демонстрирует сниженный репаративный потенциал на фоне накопления НЧ SeO. Согласно современным представлениям, появление двуядерных клеток происходит в результате митоза гепатоцитов без цитотомии либо амитотического деления гепатоцитов и сопровождает репаративную регенерацию поврежденной печени [38].

При отсутствии реакции при низких испытуемых дозах НЧ SeO выявлена устойчивая тенденция к снижению содержания ДГ при кратном увеличении суммарной дозы НЧ до 18 и 36 мг/кг.

При наименьшей испытуемой дозе экспозиции НЧ SeO (3,6 мг/кг) процент ДГ сохраняется на уровне, сопоставимом с контрольной группой. При увеличении нагрузки НЧ SeO (18 и 36 мг/кг) на клетки печени наряду с увеличением процента ДИГ (рис. 2) происходит уменьшение процентного содержания ДГ (рис. 3), отражающее снижение репаративной способности печени ($p < 0,01$).

В ответ на повреждение клеток печени в зону воспаления привлекаются макрофаги. Представителями макрофагального сообщества являются КК и поступающие с током крови моноциты и нейтрофильные лейкоциты (НЛ). Для описания дозозависимого эффекта НЧ SeO на содержание КК в мазках-отпечатках печени применен вариант с линейной комбинацией полиномов Чебышёва (формула (3)).

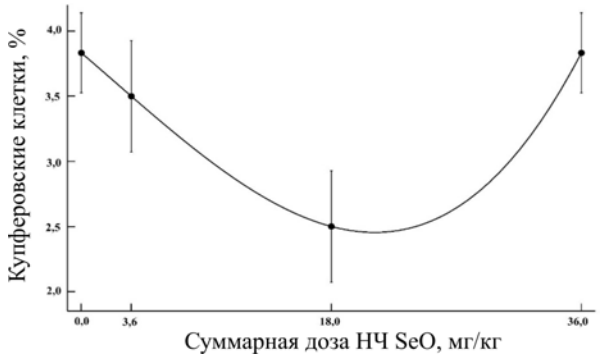


Рис. 4. Изменение содержания Купферовских макрофагов в мазках-отпечатках печени экспонированных животных под влиянием НЧ SeO (данные приведены как среднее ± ошибка среднего)

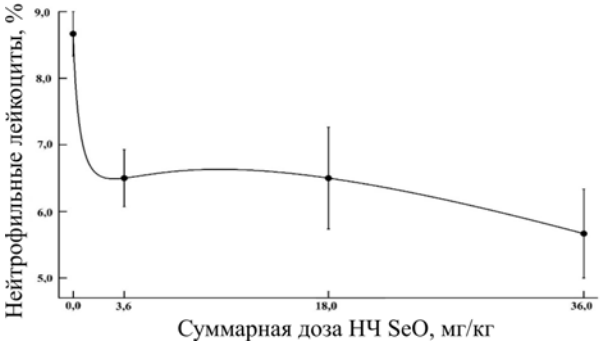


Рис. 5. Изменение содержания НЛ в мазках-отпечатках печени под влиянием НЧ SeO (данные приведены как среднее ± ошибка среднего)

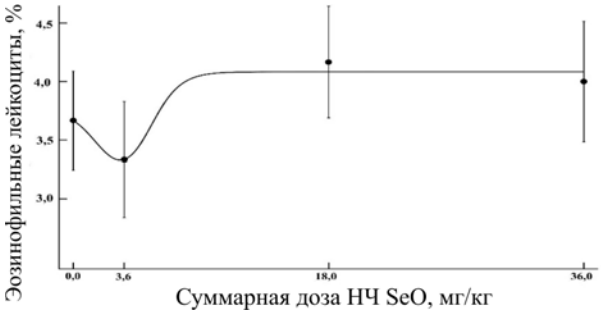


Рис. 6. Изменение содержания ЭЛ в мазках-отпечатках печени под влиянием НЧ SeO (данные приведены как среднее ± ошибка среднего)

Процентное содержание КК в мазках-отпечатках печени значимо снижается при нагрузке НЧ SeO 3,6 мг/кг и имеет более выраженный характер при концентрации 18 мг/кг ($p < 0,05$), однако при достижении концентрации 36 мг/кг количество КК возвращается к исходным, сравнимым с контрольными значениям (рис. 4). Количественное восстановление КК объясняется пролиферацией *in situ* [39], притоком и дифференцировкой в тканевые макрофаги моноцитов крови [40, 41]. При повреждении клеток в очаг воспаления привлекаются КК и лейкоциты крови (моноциты, НЛ и эозинофильные лейкоциты (ЭЛ)), которые играют немаловажную функцию в макрофагальной деструкции поврежденных клеток и замещении дегенеративных клеток на новые клетки и даже другие ткани [38]. При незначительных повреждениях, происходящих в течение длительного периода, возможно формирование очага хронического воспаления и замещение тканей на соединительнотканную с очагами фиброза. Поэтому так важно прогнозирование повреждающих эффектов.

При сопоставлении графиков ДИГ (рис. 2) и КК (рис. 4) становится очевидным, что колебания количества КК могут быть связаны с деструкцией гепатоцитов под действием НЧ SeO и репаративными процессами в печени, которые поддерживаются пролиферацией КК и притоком извне. В период восстановительной регенерации печени полиморфноядерные лейкоциты, КК и эндотелиоциты секретируют металлопротеиназы (коллагеназы, желатиназы, эластазы и другие протеиназы), изменяя плотность внеклеточного матрикса для доставки регуляторных сигналов всем клеткам печени (цитокинов) [42, 43]. Максимальное снижение КК при экспозиции НЧ SeO 18 мг/кг можно связать не только с прямым токсическим действием НЧ на клетки, но и с их миграцией в лимфатические узлы, связанной с антигенпрезентирующей функцией.

При дефиците макрофагов к процессу удаления разрушенных клеток подключаются клетки крови (НЛ и ЭЛ), изменение процента которых связано с активацией воспалительного дегенеративного процесса в печени. Привлечение НЛ в поврежденную печень происходит с помощью медиаторов воспаления [38]. НЛ сами выделяют достаточное количество хемоаттрактантов для привлечения других клеток. Организмом поддерживается необходимая и достаточная для поддержания очага воспаления популяция НЛ.

В мазках-отпечатках для описания зависимости процентного содержания НЛ (рис. 5) от суммарной нагрузки НЧ SeO использовали модель [29] на основе функции Хилла (формула (1)), которая отражала тенденцию к снижению доли НЛ в мазке вследствие токсического действия на них НЧ.

Сопоставимое снижение в форме плато процентного содержания НЛ в мазках-отпечатках печени происходит на малых (3,6 мг/кг) и средних (18 мг/кг) экспонированных дозах НЧ SeO, которое усугубляется при более высоких суммарных дозах (36 мг/кг) ($p < 0,05$).

Снижение процентного содержания НЛ при малых экспонированных дозах (3,6 мкг/кг) приводит к мобилизации организма в виде незначительного подъема процентного содержания эозинофилов (рис. 6) в мазках-отпечатках печени на более высоких дозах экспозиции (18 и 36 мг/кг) НЧ SeO. Дозоответная зависимость [30] для ЭЛ, показана на рис. 6.

График дозозависимого изменения содержания ЭЛ в мазках-отпечатках печени примечателен тем, что колебания процентного содержания ЭЛ в отпечатках связаны с формированием воспалительного ответа. Разрушение ЭЛ при наименьшей испытуе-

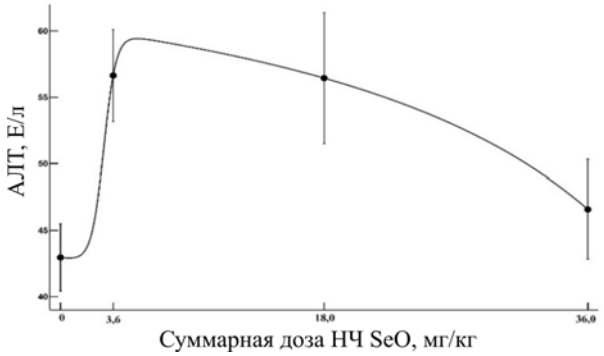


Рис. 7. Изменение активности АЛТ в крови под влиянием НЧ SeO (данные приведены как среднее ± ошибка среднего)

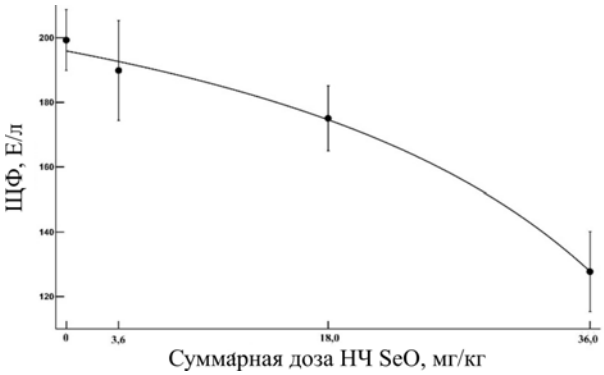


Рис. 8. Изменение активности ЩФ в крови под влиянием НЧ SeO (данные приведены как среднее ± ошибка среднего)

мой дозе НЧ SeO 3,6 мг/кг с высвобождением цитотоксических гранул ЭЛ способствует, с одной стороны, разрушению тканей, а с другой стороны, с высвобождением интерлейкина-4 (IL-4) стимулируется регенерация печени [44, 45]. Полученные результаты, представленные нелинейными функциями, объяснимы с позиции регулирования процессов в печени мигрирующими клетками системы крови и иммунной системы [38]. Эти клетки, продуцируя цитокины (интерлейкины, хемокины, ростовые факторы) и посредством контактного взаимодействия, контролируют экспрессию рецепторов различных клеток печени, предопределяя в ней процесс регенерации [46].

Нарушение функционирования жизненно важных органов и систем, создающих угрозу жизни и здоровью, связано со способностью НЧ проникать в кровеносное русло и в клетки различных органов [47]. Печень известна своей детоксикационной способностью и хорошим кровоснабжением и является органом-мишенью для НЧ SeO [35]. У экспонированных НЧ SeO животных наблюдается изменение функциональной активности печени, что прослеживается на примере ферментов сыворотки крови. Сохранение ДИГ на уровне 11,0–12,33 % создает предпосылки для увеличения выхода ферментов в кровь. При повреждении клеток в межклеточную жидкость выходят ферменты, сначала находящиеся в цитозоле и лизосомах, а при более глубоком повреждении находящиеся в митохондриях, рибосомах и ядре этих клеток. Чем больше очаг и глубина повреждения, тем большая концентрация фермента попадает в межклеточное пространство и кровь.

Для оценки влияния НЧ SeO на активность АЛТ и ЩФ в сыворотке крови при построении зависимости «доза – эффект» использованы модифицированная модель Джонсон – Ловетт [30] для АЛТ (рис. 7) и модель, приближенная к уравнению Михаэлиса – Ментен, для ЩФ (рис. 8).

Полученные в ходе эксперимента с НЧ SeO реакции организма «доза – эффект» имели немонотонный характер, что вполне объяснимо с позиции многокомпонентности биологической системы. При рассмотрении графиков зависимости активности АЛТ и процентного содержания ДИГ клеток прослеживается взаимосвязь между увеличением концентрации раздражителя и изменениями концентрации АЛТ и дегенеративных гепатоцитов. При незначительном снижении содержания ДИГ на низких концентрациях раздражителя резко увеличивается содержание АЛТ в крови. Наблюдаемая немонотонность обеих функций связана с повреждающим действием НЧ SeO на клетки печени и выбросом маркера цитолиза АЛТ. Однако при наименьших испытуемых дозах НЧ SeO резкое увеличение активности АЛТ сопровождалось незначительным ростом доли ДИГ, в то время как зависимости этих показателей на средней и высокой испытуемых дозах однотипно снижаются ($p < 0{,}05$). Резкий подъем активности АЛТ становится объяснимым при сопоставлении графиков изменения доли НЛ и ЭЛ[1], КК в мазках-отпечатках печени и АЛТ (см. рис. 4–7). Вклад этих клеток, вернее их разрушение [20], вследствие токсического влияния НЧ SeO увеличивает концентрацию цитозольного фермента АЛТ при низкой дозе НЧ 3,6 мг/кг.

С токсическим действием НЧ SeO на клетки эпителия желчевыводящих путей связано дозозависимое снижение концентрации ЩФ в сыворотке крови во всех группах, экспонированных с НЧ SeO.

Несмотря на то что основной вклад в увеличение ЩФ в крови вносится разрушенными эпителиальными клетками (желчевыводящих путей, кишечника, щеточной каемки почек, костной ткани), необходимо отметить роль клеток миелоидного ряда, в том числе НЛ и ЭЛ, в изменении концентрации ЩФ в крови. Поступление ШФ в кровь, сопровождающее разрушение клеток эпителия желчевыводящих путей, может усиливаться за счет разрушения НЛ и ЭЛ, что проявляется при экспозиции НЧ SeO 3,6 мг/кг (см. рис. 5, 6). Наиболее выраженное снижение активности ЩФ наблюдалось при наибольшей испытуемой дозе SeO 36 мг/кг в группе

[1] Кишкун А.А., Беганская Л.А. Клиническая лабораторная диагностика: уч. пособие: 2 т. – 2-е изд. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2021. – 1000 с.

«НЧ SeO 36» (рис. 8) ($p < 0,05$). Вероятно, дозозависимое снижение активности ЩФ с увеличением экспонируемого НЧ SeO связано с недостатком цинка и магния, входящих в состав фермента, но данные о конкурентных взаимодействиях между магнием / цинком и селеном отсутствуют.

Изменения структуры митохондрий клеток печени, нарушенный баланс ферментов крови и клеточного состава печени могут указывать на повреждение печени и нарушение ее функций под действием НЧ SeO. Математическое моделирование может использоваться в оценке дозозависимого общетоксического действия на уровне клеток, тканей, органов и для анализа риска здоровью.

Выводы:

1. Выявлена нетипичная дозоответная зависимость изменений в печени для НЧ SeO. НЧ SeO-зависимости «доза – эффект» нелинейны и описываются немонотонными функциями для показателей: процентное содержание ЭЛ, НЛ, КК, ДИГ, активность ферментов АЛТ и ЩФ.

2. Доказана эффективность применения математических моделей, построенных на основе линейной комбинации полиномов Чебышёва, уравнения Михаэлиса – Ментен, модифицированных функции Хилла и модели Джонсон – Ловетт для описания дозозависимых негативных эффектов, вызываемых воздействием НЧ SeO.

3. Наибольшую опасность представляют токсические эффекты на низких (3,6 мг/кг м.т.) и средних (18 мг/кг м.т.) тестируемых дозах НЧ SeO, что подтверждается изменениями показателей активности АЛТ и ЩФ, процентного содержания ДИГ и КК.

4. Максимально выражены негативные эффекты экспонируемой дозы 36 мг/кг м.т. НЧ SeO для процентного содержания ДГ и НЛ в печени.

Таким образом, при разработке стандартов химической безопасности и оценке рисков здоровью необходимо учитывать, что при субхроническом поступлении наибольшее количество выраженных токсических эффектов и опасность развития патологических нарушений наблюдаются на низких и средних тестируемых дозах НЧ SeO.

Финансирование. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Tsivileva O., Pozdnyakov A., Ivanova A. Polymer Nanocomposites of Selenium Biofabricated Using Fungi // Molecules. – 2021. – Vol. 26, № 12. – P. 3657. DOI: 10.3390/molecules26123657

2. Selenium Analysis and Speciation in Dietary Supplements Based on Next-Generation Selenium Ingredients / D. Constantinescu-Aruxandei, R.M. Frîncu, L. Capră, F. Oancea // Nutrients. – 2018. – Vol. 10, № 10. – P. 1466. DOI: 10.3390/nu10101466

3. Therapeutic applications of selenium nanoparticles / A. Khurana, S. Tekula, M.A. Saifi, P. Venkatesh, C. Godugu // Biomed. Pharmacother. – 2019. – Vol. 111. – P. 802–812. DOI: 10.1016/j.biopha.2018.12.146

4. Synthesis and comparative assessment of antiradical activity, toxicity, and biodistribution of κ-carrageenan-capped selenium nanoparticles of different size: in vivo and in vitro study / M. Lesnichaya, R. Shendrik, E. Titov, B. Sukhov // IET Nanobiotechnol. – 2020. – Vol. 14, № 6. – P. 519–526. DOI: 10.1049/iet-nbt.2020.0023

5. Dual-Targeted Selenium Nanoparticles for Synergistic Photothermal Therapy and Chemotherapy of Tumors / X. Fang, C. Li, L. Zheng, F. Yang, T. Chen // Chem. Asian J. – 2018. – Vol. 13, № 8. – P. 996–1004. DOI: 10.1002/asia.201800048

6. Synthesis, toxicity evaluation and determination of possible mechanisms of antimicrobial effect of arabinogalactane-capped selenium nanoparticles / M. Lesnichaya, A. Perfileva, O. Nozhkina, A. Gazizova, I. Graskova // J. Trace Elem. Med. Biol. – 2022. – Vol. 69. – P. 126904. DOI: 10.1016/j.jtemb.2021.126904

7. Духновский Е.А. Применение наночастиц селена в онкологии (обзор) // Разработка и регистрация лекарственных средств. – 2023. – Т. 12, № 2. – С. 34–43. DOI: 10.33380/2305-2066-2023-12-2-34-43

8. Toxicological effects of nanoselenium in animals / I. Bano, S. Skalickova, S. Arbab, L. Urbankova, P. Horky // J. Anim. Sci. Biotechnol. – 2022. – Vol. 13, № 1. – P. 72. DOI: 10.1186/s40104-022-00722-2

9. Selenium Nanoparticles Act Potentially on the Growth Performance, Hemato-Biochemical Indices, Antioxidative, and Immune-Related Genes of European Seabass (Dicentrarchus labrax) / M.F. Abd El-Kader, A.F. Fath El-Bab, M.F. Abd-Elghany, A.-W.A. Abdel-Warith, E.M. Younis, M.A.O. Dawood // Biol. Trace Elem. Res. – 2021. – Vol. 199, № 8. – P. 3126–3134. DOI: 10.1007/s12011-020-02431-1

10. Selenium nanoparticles derived from Proteus mirabilis YC801 alleviate oxidative stress and inflammatory response to promote nerve repair in rats with spinal cord injury / X. Liu, Y. Mao, S. Huang, W. Li, W. Zhang, J. An, Y. Jin, J. Guan [et al.] // Regen. Biomater. – 2022. – Vol. 9. – P. rbac042. DOI: 10.1093/rb/rbac042

11. Safety of selenium exposure and limitations of selenoprotein maximization: Molecular and epidemiologic perspectives / M. Vinceti, T. Filippini, E. Jablonska, Y. Saito, L.A. Wise // Environ. Res. – 2022. – Vol. 211. – P. 113092. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113092

12. Subacute oral toxicity investigation of selenium nanoparticles and selenite in rats / N. Hadrup, K. Loeschner, K. Mandrup, G. Ravn-Haren, H.L. Frandsen, E.H. Larsen, H.R. Lam, A. Mortensen // Drug Chem. Toxicol. – 2019. – Vol. 42, № 1. – P. 76–83. DOI: 10.1080/01480545.2018.1491589

13. Age-Dependent Assessment of Selenium Nanoparticles: Biodistribution and Toxicity Study in Young and Adult Rats / H. Singh, J. Kaur, A.K. Datusalia, S. Naqvi // Nanomedicine (Lond.). – 2023. – Vol. 18, № 27. – P. 2021–2038. DOI: 10.2217/nnm-2023-0204

14. Effects of Sub-Lethal Doses of Selenium Nanoparticles on the Health Status of Rats / L. Urbankova, S. Skalickova, M. Pribilova, A. Ridoskova, P. Pelcova, J. Skladanka, P. Horky // Toxics. – 2021. – Vol. 9, № 2. – P. 28. DOI: 10.3390/toxics9020028

15. Absorption, distribution, metabolism and excretion of selenium following oral administration of elemental selenium nanoparticles or selenite in rats / K. Loeschner, N. Hadrup, M. Hansen, S.A. Pereira, B. Gammelgaard, L. Hyrup Møller, A. Mortensen, H.R. Lam, E.H. Larsen // Metallomics. – 2014. – Vol. 6, № 2. – P. 330–337. DOI: 10.1039/c3mt00309d

16. Toxicity of selenium nanoparticles in male Sprague–Dawley rats at supranutritional and nonlethal levels / Y. He, S. Chen, Z. Liu, C. Cheng, H. Li, M. Wang // Life Sci. – 2014. – Vol. 115, № 1–2. – P. 44–51. DOI: 10.1016/j.lfs.2014.08.023

17. Chaudière J. Biological and Catalytic Properties of Selenoproteins // Int. J. Mol. Sci. – 2023. – Vol. 24, № 12. – P. 10109. DOI: 10.3390/ijms241210109

18. Lesnichaya M., Karpova E., Sukhov B. Effect of high dose of selenium nanoparticles on antioxidant system and biochemical profile of rats in correction of carbon tetrachloride-induced toxic damage of liver // Colloids Surf. B Biointerfaces. – 2021. – Vol. 197. – P. 111381. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2020.111381

19. Dumore N.S., Mukhopadhyay M. Antioxidant properties of aqueous selenium nanoparticles (ASeNPs) and its catalysts activity for 1, 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) reduction // Journal of Molecular Structure. – 2020. – Vol. 1205. – P. 127637. DOI: 10.1016/j.molstruc.2019.127637

20. Histopathological assessment of protective effects of selenium nanoparticles on rat hepatocytes exposed to Gamma radiation / A. Sohrabi, A.A. Tehrani, S. Asri-Rezaei, A. Zeinali, M. Norouzi // Vet. Res. Forum. – 2020. – Vol. 11, № 4. – P. 347–353. DOI: 10.30466/vrf.2018.93499.2260

21. Systematic acute and subchronic toxicity evaluation of polysaccharide–protein complex-functionalized selenium nanoparticles with anticancer potency / Z. Zhang, Y. Du, T. Liu, K.-H. Wong, T. Chen // Biomater. Sci. – 2019. – Vol. 7, № 12. – P. 5112–5123. DOI: 10.1039/C9BM01104H

22. Comparing the Influences of Selenium Nanospheres, Sodium Selenite, and Biological Selenium on the Growth Performance, Blood Biochemistry, and Antioxidative Capacity of Growing Turkey Pullets / S.E. Ibrahim, M.H. Alzawqari, Y.Z. Eid, M. Zommara, A.M. Hassan, M.A.O. Dawood // Biol. Trace Elem. Res. – 2022. – Vol. 200, № 6. – P. 2915–2922. DOI: 10.1007/s12011-021-02894-w

23. Dose-dependent hepatic toxicity and oxidative stress on exposure to nano and bulk selenium in mice / P. Kondaparthi, M. Deore, S. Naqvi, S.J.S. Flora // Environ. Sci. Pollut. Res. – 2021. – Vol. 28, № 38. – P. 53034–53044. DOI: 10.1007/s11356-021-14400-9

24. Pilot study of toxicological safety evaluation in acute and 28-day studies of selenium nanoparticles decorated by polysaccharides from Sargassum fusiforme in Kunming mice / H. Zhao, C. Liu, J. Song, X. Fan // J. Food Sci. – 2022. – Vol. 87, № 9. – P. 4264–4279. DOI: 10.1111/1750-3841.16289

25. Elemental Selenium at Nano Size (Nano-Se) as a Potential Chemopreventive Agent with Reduced Risk of Selenium Toxicity: Comparison with Se-Methylselenocysteine in Mice / J. Zhang, X. Wang, T. Xu // Toxicol. Sci. – 2008. – Vol. 101, № 1. – P. 22–31. DOI: 10.1093/toxsci/kfm221

26. Selenium Nanoparticles: A Comprehensive Examination of Synthesis Techniques and Their Diverse Applications in Medical Research and Toxicology Studies / S. Sampath, V. Sunderam, M. Manjusha, Z. Dlamini, A.V. Lawrance // Molecules. – 2024. – Vol. 29, № 4. – P. 801. DOI: 10.3390/molecules29040801

27. Wang H., Zhang J., Yu H. Elemental selenium at nano size possesses lower toxicity without compromising the fundamental effect on selenoenzymes: Comparison with selenomethionine in mice // Free Radic. Biol. Med. – 2007. – Vol. 42, № 10. – P. 1524–1533. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2007.02.013

28. Оценка влияния на биоэнергетические процессы клеток наночастиц селена как фактора химического риска производственной и окружающей среды для здоровья / Ю.В. Рябова, М.П. Сутункова, А.И. Чемезов, И.А. Минигалиева, Т.В. Бушуева, И.Г. Шеломенцев, С.В. Клинова // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. – 2022. – № 9. – С. 29–34. DOI: 10.35627/2219-5238/2022-30-9-29-34

29. Some Peculiarities in the Dose Dependence of Separate and Combined In Vitro Cardiotoxicity Effects Induced by CdS and PbS Nanoparticles With Special Attention to Hormesis Manifestations / V. Panov, I. Minigalieva, T. Bushueva, E. Fröhlich, C. Meindl, M. Absenger-Novak, V. Shur, E. Shishkina [et al.] // Dose Response. – 2020. – Vol. 18, № 1. – P. 1559325820914180. DOI: 10.1177/1559325820914180

30. Mathematical Modeling of Plant Allelopathic Hormesis Based on Ecological-Limiting-Factor Models / Y. Liu, X. Chen, S. Duan, Y. Feng, M. An // Dose Response. – 2010. – Vol. 9, № 1. – P. 117–129. DOI: 10.2203/dose-response.09-050.Liu

31. Weiss B. The intersection of neurotoxicology and endocrine disruption // Neurotoxicology. – 2012. – Vol. 33, № 6. – P. 1410–1419. DOI: 10.1016/j.neuro.2012.05.014

32. Predicting Hormetic Effects of Ionic Liquid Mixtures on Luciferase Activity Using the Concentration Addition Model / H.-L. Ge, S.-S. Liu, X.-W. Zhu, H.-L. Liu, L.-J. Wang // Environ. Sci. Technol. – 2011. – Vol. 45, № 4. – P. 1623–1629. DOI: 10.1021/es1018948

33. Modeling non-monotonic dose–response relationships: Model evaluation and hormetic quantities exploration / X.-W. Zhu, S.-S. Liu, L.-T. Qin, F. Chen, H.-L. Liu // Ecotoxicol. Environ. Saf. – 2013. – Vol. 89. – P. 130–136. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2012.11.022

34. Nweke C.O., Ogbonna C.J. Statistical models for biphasic dose-response relationships (hormesis) in toxicological studies // Ecotoxicology and Environmental Contamination. – 2017. – Vol. 12, № 1. – P. 39–55. DOI: 10.5132/eec.2017.01.06

35. Prooxidation and Cytotoxicity of Selenium Nanoparticles at Nonlethal Level in Sprague-Dawley Rats and Buffalo Rat Liver Cells / H. Wang, Y. He, L. Liu, W. Tao, G. Wang, W. Sun, X. Pei, Z. Xiao [et al.] // Oxid. Med. Cell. Longev. – 2020. – Vol. 2020. – P. 7680276. DOI: 10.1155/2020/7680276

36. Recent advances in 2D and 3D in vitro systems using primary hepatocytes, alternative hepatocyte sources and non-parenchymal liver cells and their use in investigating mechanisms of hepatotoxicity, cell signaling and ADME / P. Godoy, N.J. Hewitt, U. Albrecht, M.E. Andersen, N. Ansari, S. Bhattacharya, J.G. Bode, J. Bolleyn [et al.] // Arch. Toxicol. – 2013. – Vol. 87, № 8. – P. 1315–1530. DOI: 10.1007/s00204-013-1078-5

37. Bilzer M., Roggel F., Gerbes A.L. Role of Kupffer cells in host defense and liver disease // Liver Int. – 2006. – Vol. 26, № 10. – P. 1175–1186. DOI: 10.1111/j.1478-3231.2006.01342.x

38. Unveiling the power of microenvironment in liver regeneration: an in-depth overview / Y. Hu, R. Wang, N. An, C. Li, Q. Wang, Y. Cao, C. Li, J. Liu, Y. Wang // Front. Genet. – 2023. – Vol. 14. – P. 1332190. DOI: 10.3389/fgene.2023.1332190

39. Bone marrow-derived monocytes give rise to self-renewing and fully differentiated Kupffer cells. / C.L. Scott, F. Zheng, P. De Baetselier, L. Martens, Y. Saeys, S. De Prijck, S. Lippens, C. Abels [et al.] // Nat. Commun. – 2016. – Vol. 7. – P. 10321. DOI: 10.1038/ncomms10321

40. Combination of Mass Cytometry and Imaging Analysis Reveals Origin, Location, and Functional Repopulation of Liver Myeloid Cells in Mice / B.A. David, R.M. Rezende, M.M. Antunes, M. Morais Santos, M.A. Freitas Lopes, A. Barros Diniz, R. Vaz Sousa Pereira, S. Cozzer Marchesi [et al.] // Gastroenterology. – 2016. – Vol. 151, № 6. – P. 1176–1191. DOI: 10.1053/j.gastro.2016.08.024

41. Wang J., Kubes P. A Reservoir of Mature Cavity Macrophages that Can Rapidly Invade Visceral Organs to Affect Tissue Repair // Cell. – 2016. – Vol. 165, № 3. – P. 668–678. DOI: 10.1016/j.cell.2016.03.009

42. Kanta J. Collagen matrix as a tool in studying fibroblastic cell behavior // Cell Adh. Migr. – 2015. – Vol. 9, № 4. – P. 308–316. DOI: 10.1080/19336918.2015.1005469

43. Strategies and endpoints of antifibrotic drug trials: Summary and recommendations from the AASLD Emerging Trends Conference, Chicago, June 2014 / N.J. Torok, J.A. Dranoff, D. Schuppan, S.L. Friedman // Hepatology. – 2015. – Vol. 62, № 2. – P. 627–634. DOI: 10.1002/hep.27720

44. Eosinophils secrete IL-4 to facilitate liver regeneration / Y.P.S. Goh, N.C. Henderson, J.E. Heredia, A.R. Eagle, J.I. Odegaard, N. Lehwald, K.D. Nguyen, D. Sheppard [et al.] // Proc. Natl Acad. Sci. USA. – 2013. – Vol. 110, № 24. – P. 9914–9919. DOI: 10.1073/pnas.1304046110

45. Novel IL-4/HB-EGF-dependent crosstalk between eosinophils and macrophages controls liver regeneration after ischaemia and reperfusion injury / Y. Yang, L. Xu, C. Atkins, L. Kuhlman, J. Zhao, J.-M. Jeong, Y. Wen, N. Moreno [et al.] // Gut. – 2024. – Vol. 73, № 9. – P. 1543–1553. DOI: 10.1136/gutjnl-2024-332033

46. Michalopoulos G.K., Bhushan B. Liver regeneration: biological and pathological mechanisms and implications // Nat. Rev. Gastroenterol. Hepatol. – 2021. – Vol. 18, № 1. – P. 40–55. DOI: 10.1038/s41575-020-0342-4

47. The Toxicity Phenomenon and the Related Occurrence in Metal and Metal Oxide Nanoparticles: A Brief Review From the Biomedical Perspective / S. Attarilar, J. Yang, M. Ebrahimi, Q. Wang, J. Liu, Y. Tang, J. Yang // Front. Bioeng. Biotechnol. – 2020. – Vol. 8. – P. 822. DOI: 10.3389/fbioe.2020.00822

К оценке потенциального риска дозозависимых эффектов гепатотоксичности наночастиц оксида селена / М.П. Сутункова, И.А. Минигалиева, В.Г. Панов, Т.В. Махорина, М.С. Унесихина, И.Г. Шеломенцев, Р.Р. Сахаутдинова // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 2. – С. 114–125. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.10

UDC 613.6.02
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.10.eng

Read online

Research article

ON ASSESSING THE POTENTIAL RISK OF DOSE-DEPENDENT HEPATOTOXIC EFFECTS OF SELENIUM OXIDE NANOPARTICLES

M.P. Sutunkova[1,2], I.A. Minigalieva[1], V.G. Panov[1,3], T.V. Makhorina[1], M.S. Unesikhina[1], I.G. Shelomentsev[1], R.R. Sakhautdinova[1]

[1]Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, 30 Popov St., Yekaterinburg, 620014, Russian Federation
[2]Ural State Medical University, 3 Repin St., Yekaterinburg, 620028, Russian Federation
[3]Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Sofia Kovalevskaya St., Yekaterinburg, 620990, Russian Federation

Selenium nanoparticles (Se NPs) have found wide application in many human economic activities. Therefore, it is necessary to predict and assess emerging potential health risks. Nanotoxicants can affect the body causing negative effects that have a non-linear dependence on the dose of a toxic substance. There is no consensus on the LD_{50} of Se NPs. Recent data on the dose-dependent liver response to different exposures of selenium nanoparticles are contradictory.

The aim is to study and characterize potentially adverse dose-dependent effects in the liver under exposure to selenium oxide nanoparticles in a subchronic experiment using mathematical models.

Exposure was modeled on male rats aged 3 to 4 months, 12 animals in each group. We used three levels of selenium nanoxide doses for subchronic exposure: 3.6, 18, and 36 mg/kg. The research was approved by the Local Ethics Committee of the Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (Protocol No. 2 of April 20, 2021).

We observed an atypical dose-response relationship between selenium nanooxide exposure and hepatic changes. The negative effects included pronounced changes in mitochondria of liver cells as well as an imbalance of blood enzymes and

cellular composition of the liver, which may indicate damage to the organ and impaired secretory functions following the exposure to low and moderate concentrations of SeO nanoparticles.

Our findings can be used for determining chemical safety standards for selenium oxide nanoparticles and assessing their health risks.

Keywords: *nanoparticles, in vivo, dose-effect, selenium oxide, hepatotoxicity, Kupffer cells, hepatocytes, health risk.*

References

1. Tsivileva O., Pozdnyakov A., Ivanova A. Polymer Nanocomposites of Selenium Biofabricated Using Fungi. *Molecules*, 2021, vol. 26, no. 12, pp. 3657. DOI: 10.3390/molecules26123657

2. Constantinescu-Aruxandei D., Frîncu R.M., Capră L., Oancea F. Selenium Analysis and Speciation in Dietary Supplements Based on Next-Generation Selenium Ingredients. *Nutrients*, 2018, vol. 10, no. 10, pp. 1466. DOI: 10.3390/nu10101466

3. Khurana A., Tekula S., Saifi M.A., Venkatesh P., Godugu C. Therapeutic applications of selenium nanoparticles. *Biomed. Pharmacother.*, 2019, vol. 111, pp. 802–812. DOI: 10.1016/j.biopha.2018.12.146

4. Lesnichaya M., Shendrik R., Titov E., Sukhov B. Synthesis and comparative assessment of antiradical activity, toxicity, and biodistribution of κ-carrageenan-capped selenium nanoparticles of different size: in vivo and in vitro study. *IET Nanobiotechnol.*, 2020, vol. 14, no. 6, pp. 519–526. DOI: 10.1049/iet-nbt.2020.0023.

5. Fang X., Li C., Zheng L., Yang F., Chen T. Dual-Targeted Selenium Nanoparticles for Synergistic Photothermal Therapy and Chemotherapy of Tumors. *Chem. Asian J.*, 2018, vol. 13, no. 8, pp. 996–1004. DOI: 10.1002/asia.201800048

6. Lesnichaya M., Perfileva A., Nozhkina O., Gazizova A., Graskova I. Synthesis, toxicity evaluation and determination of possible mechanisms of antimicrobial effect of arabinogalactane-capped selenium nanoparticles. *J. Trace Elem. Med. Biol.*, 2022, vol. 69, pp. 126904. DOI: 10.1016/j.jtemb.2021.126904

7. Dukhnovsky E.A. Application of Selenium Nanoparticles in Oncology (Review). *Drug development and registration*, 2023, vol. 12, no. 2, pp. 34–43. DOI: 10.33380/2305-2066-2023-12-2-34-43 (in Russian).

8. Bano I., Skalickova S., Arbab S., Urbankova L., Horky P. Toxicological effects of nanoselenium in animals. *J. Anim. Sci. Biotechnol.*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 72. DOI: 10.1186/s40104-022-00722-2

9. Abd El-Kader M.F., Fath El-Bab A.F., Abd-Elghany M.F., Abdel-Warith A.-W.A., Younis E.M., Dawood M.A.O. Selenium Nanoparticles Act Potentially on the Growth Performance, Hemato-Biochemical Indices, Antioxidative, and Immune-Related Genes of European Seabass (Dicentrarchus labrax). *Biol. Trace Elem. Res.*, 2021, vol. 199, no. 8, pp. 3126–3134. DOI: 10.1007/s12011-020-02431-1

10. Liu X., Mao Y., Huang S., Li W., Zhang W., An J., Jin Y., Guan J. [et al.]. Selenium nanoparticles derived from Proteus mirabilis YC801 alleviate oxidative stress and inflammatory response to promote nerve repair in rats with spinal cord injury. *Regen. Biomater.*, 2022, vol. 9, pp. rbac042. DOI: 10.1093/rb/rbac042

11. Vinceti M., Filippini T., Jablonska E., Saito Y., Wise L.A. Safety of selenium exposure and limitations of selenoprotein maximization: Molecular and epidemiologic perspectives. *Environ. Res.*, 2022, vol. 211, pp. 113092. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113092

12. Hadrup N., Loeschner K., Mandrup K., Ravn-Haren G., Frandsen H.L., Larsen E.H., Lam H.R., Mortensen A. Subacute oral toxicity investigation of selenium nanoparticles and selenite in rats. *Drug Chem. Toxicol.*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 76–83. DOI: 10.1080/01480545.2018.1491589

13. Singh H., Kaur J., Datusalia A.K., Naqvi S. Age-Dependent Assessment of Selenium Nanoparticles: Biodistribution and Toxicity Study in Young and Adult Rats. *Nanomedicine (Lond.)*, 2023, vol. 18, no. 27, pp. 2021–2038. DOI: 10.2217/nnm-2023-0204

© Sutunkova M.P., Minigalieva I.A., Panov V.G., Makhorina T.V., Unesikhina M.S., Shelomentsev I.G., Sakhautdinova R.R., 2025

Marina P. Sutunkova – Doctor of Medical Sciences, director; Head of the Department of Occupational Hygiene and Medicine (e-mail: sutunkova@ymrc.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1743-7642).

Ilzira A. Minigalieva – Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Toxicology and Bioprophylaxis (e-mail: ilzira@ymrc.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0097-7845).

Vladimir G. Panov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the Department of Toxicology and Bioprophylaxis; Associate Professor at the Department of Mathematical Analysis and Function Theory (e-mail: panov.wlad1mir@yandex.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6718-3217).

Tatyana V. Makhorina – Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher at the Department of Toxicology and Bioprophylaxis (e-mail: lisa430@yandex.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6126-9706).

Maria S. Unesikhina – Junior Researcher at the Department of Molecular Biology and Electron Microscopy (e-mail: unesihinams@ymrc.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5576-365X).

Ivan G. Shelomentsev – Researcher at the Department of Molecular Biology and Electron Microscopy (e-mail: shelomencev@ymrc.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8795-8777).

Renata R. Sakhautdinova – Candidate of Medical Sciences, Head of the Diagnostic Laboratory Department, Research and Production Association of Laboratory Diagnostic Technologies (e-mail: sahautdinova@ymrc.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2726-9259).

14. Urbankova L., Skalickova S., Pribilova M., Ridoskova A., Pelcova P., Skladanka J., Horky P. Effects of Sub-Lethal Doses of Selenium Nanoparticles on the Health Status of Rats. *Toxics*, 2021, vol. 9, no. 2, pp. 28. DOI: 10.3390/toxics9020028

15. Loeschner K., Hadrup N., Hansen M., Pereira S.A., Gammelgaard B., Hyrup Møller L., Mortensen A., Lam H.R., Larsen E.H. Absorption, distribution, metabolism and excretion of selenium following oral administration of elemental selenium nanoparticles or selenite in rats. *Metallomics*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 330–337. DOI: 10.1039/c3mt00309d

16. He Y., Chen S., Liu Z., Cheng C., Li H., Wang M. Toxicity of selenium nanoparticles in male Sprague–Dawley rats at supranutritional and nonlethal levels. *Life Sci.*, 2014, vol. 115, no. 1–2, pp. 44–51. DOI: 10.1016/j.lfs.2014.08.023

17. Chaudière J. Biological and Catalytic Properties of Selenoproteins. *Int. J. Mol. Sci.*, 2023, vol. 24, no. 12, pp. 10109. DOI: 10.3390/ijms241210109

18. Lesnichaya M., Karpova E., Sukhov B. Effect of high dose of selenium nanoparticles on antioxidant system and biochemical profile of rats in correction of carbon tetrachloride-induced toxic damage of liver. *Colloids Surf. B Biointerfaces*, 2021, vol. 197, pp. 111381. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2020.111381

19. Dumore N.S., Mukhopadhyay M. Antioxidant properties of aqueous selenium nanoparticles (ASeNPs) and its catalysts activity for 1, 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) reduction. *Journal of Molecular Structure*, 2020, vol. 1205, pp. 127637. DOI: 10.1016/j.molstruc.2019.127637

20. Sohrabi A., Tehrani A.A., Asri-Rezaei S., Zeinali A., Norouzi M. Histopathological assessment of protective effects of selenium nanoparticles on rat hepatocytes exposed to Gamma radiation. *Vet. Res. Forum*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 347–353. DOI: 10.30466/vrf.2018.93499.2260

21. Zhang Z., Du Y., Liu T., Wong K.-H., Chen T. Systematic acute and subchronic toxicity evaluation of polysaccharide–protein complex-functionalized selenium nanoparticles with anticancer potency. *Biomater. Sci.*, 2019, vol. 7, no. 12, pp. 5112–5123. DOI: 10.1039/C9BM01104H

22. Ibrahim S.E., Alzawqari M.H., Eid Y.Z., Zommara M., Hassan A.M., Dawood M.A.O. Comparing the Influences of Selenium Nanospheres, Sodium Selenite, and Biological Selenium on the Growth Performance, Blood Biochemistry, and Antioxidative Capacity of Growing Turkey Pullets. *Biol. Trace Elem. Res.*, 2022, vol. 200, no. 6, pp. 2915–2922. DOI: 10.1007/s12011-021-02894-w

23. Kondaparthi P., Deore M., Naqvi S., Flora S.J.S. Dose-dependent hepatic toxicity and oxidative stress on exposure to nano and bulk selenium in mice. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2021, vol. 28, no. 38, pp. 53034–53044. DOI: 10.1007/s11356-021-14400-9

24. Zhao H., Liu C., Song J., Fan X. Pilot study of toxicological safety evaluation in acute and 28-day studies of selenium nanoparticles decorated by polysaccharides from Sargassum fusiforme in Kunming mice. *J. Food Sci.*, 2022, vol. 87, no. 9, pp. 4264–4279. DOI: 10.1111/1750-3841.16289

25. Zhang J., Wang X., Xu T. Elemental Selenium at Nano Size (Nano-Se) as a Potential Chemopreventive Agent with Reduced Risk of Selenium Toxicity: Comparison with Se-Methylselenocysteine in Mice. *Toxicol. Sci.*, 2008, vol. 101, no. 1, pp. 22–31. DOI: 10.1093/toxsci/kfm221

26. Sampath S., Sunderam V., Manjusha M., Dlamini Z., Lawrance A.V. Selenium Nanoparticles: A Comprehensive Examination of Synthesis Techniques and Their Diverse Applications in Medical Research and Toxicology Studies. *Molecules*, 2024, vol. 29, no. 4, pp. 801. DOI: 10.3390/molecules29040801

27. Wang H., Zhang J., Yu H. Elemental selenium at nano size possesses lower toxicity without compromising the fundamental effect on selenoenzymes: Comparison with selenomethionine in mice. *Free Radic. Biol. Med.*, 2007, vol. 42, no. 10, pp. 1524–1533. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2007.02.013

28. Ryabova Yu.V., Sutunkova M.P., Chemezov A.I., Minigalieva I.A., Bushueva T.V., Shelomentsev I.G., Klinova S.V. Evaluation of Effects of Selenium Nanoparticles as an Occupational and Environmental Chemical Hazard on Cellular Bioenergetic Processes. *ZNiSO*, 2022, no. 9, pp. 29–34. DOI: 10.35627/2219-5238/2022-30-9-29-34 (in Russian).

29. Panov V., Minigalieva I., Bushueva T., Fröhlich E., Meindl C., Absenger-Novak M., Shur V., Shishkina E. [et al.]. Some Peculiarities in the Dose Dependence of Separate and Combined In Vitro Cardiotoxicity Effects Induced by CdS and PbS Nanoparticles With Special Attention to Hormesis Manifestations. *Dose Response*, 2020, vol. 18, no. 1, pp. 1559325820914180. DOI: 10.1177/1559325820914180

30. Liu Y., Chen X., Duan S., Feng Y., An M. Mathematical Modeling of Plant Allelopathic Hormesis Based on Ecological-Limiting-Factor Models. *Dose Response*, 2010, vol. 9, no. 1, pp. 117–129. DOI: 10.2203/dose-response.09-050.Liu

31. Weiss B. The intersection of neurotoxicology and endocrine disruption. *Neurotoxicology*, 2012, vol. 33, no. 6, pp. 1410–1419. DOI: 10.1016/j.neuro.2012.05.014

32. Ge H.-L., Liu S.-S., Zhu X.-W., Liu H.-L., Wang L.-J. Predicting Hormetic Effects of Ionic Liquid Mixtures on Luciferase Activity Using the Concentration Addition Model. *Environ. Sci. Technol.*, 2011, vol. 45, no. 4, pp. 1623–1629. DOI: 10.1021/es1018948

33. Zhu X.-W., Liu S.-S., Qin L.-T., Chen F., Liu H.-L. Modeling non-monotonic dose–response relationships: Model evaluation and hormetic quantities exploration. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2013, vol. 89, pp. 130–136. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2012.11.022

34. Nweke C.O., Ogbonna C.J. Statistical models for biphasic dose-response relationships (hormesis) in toxicological studies. *Ecotoxicology and Environmental Contamination*, 2017, vol. 12, no. 1, pp. 39–55. DOI: 10.5132/eec.2017.01.06

35. Wang H., He Y., Liu L., Tao W., Wang G., Sun W., Pei X., Xiao Z. [et al.]. Prooxidation and Cytotoxicity of Selenium Nanoparticles at Nonlethal Level in Sprague-Dawley Rats and Buffalo Rat Liver Cells. *Oxid. Med. Cell. Longev.*, 2020, vol. 2020, pp. 7680276. DOI: 10.1155/2020/7680276

36. Godoy P., Hewitt N.J., Albrecht U., Andersen M.E., Ansari N., Bhattacharya S., Bode J.G., Bolleyn J. [et al.]. Recent advances in 2D and 3D in vitro systems using primary hepatocytes, alternative hepatocyte sources and non-parenchymal liver

cells and their use in investigating mechanisms of hepatotoxicity, cell signaling and ADME. *Arch. Toxicol.*, 2013, vol. 87, no. 8, pp. 1315–1530. DOI: 10.1007/s00204-013-1078-5

37. Bilzer M., Roggel F., Gerbes A.L. Role of Kupffer cells in host defense and liver disease. *Liver Int.*, 2006, vol. 26, no. 10, pp. 1175–1186. DOI: 10.1111/j.1478-3231.2006.01342.x

38. Hu Y., Wang R., An N., Li C., Wang Q., Cao Y., Li C., Liu J., Wang Y. Unveiling the power of microenvironment in liver regeneration: an in-depth overview. *Front. Genet.*, 2023, vol. 14, pp. 1332190. DOI: 10.3389/fgene.2023.1332190

39. Scott C.L., Zheng F., De Baetselier P., Martens L., Saeys Y., De Prijck S., Lippens S., Abels C. [et al.]. Bone marrow-derived monocytes give rise to self-renewing and fully differentiated Kupffer cells. *Nat. Commun.*, 2016, vol. 7, pp. 10321. DOI: 10.1038/ncomms10321

40. David B.A., Rezende R.M., Antunes M.M., Morais Santos M., Freitas Lopes M.A., Barros Diniz A., Vaz Sousa Pereira R., Cozzer Marchesi S. [et al.]. Combination of Mass Cytometry and Imaging Analysis Reveals Origin, Location, and Functional Repopulation of Liver Myeloid Cells in Mice. *Gastroenterology*, 2016, vol. 151, no. 6, pp. 1176–1191. DOI: 10.1053/j.gastro.2016.08.024

41. Wang J., Kubes P. Reservoir of Mature Cavity Macrophages that Can Rapidly Invade Visceral Organs to Affect Tissue Repair. *Cell*, 2016, vol. 165, no. 3, pp. 668–678. DOI: 10.1016/j.cell.2016.03.009

42. Kanta J. Collagen matrix as a tool in studying fibroblastic cell behavior. *Cell Adh. Migr.*, 2015, vol. 9, no. 4, pp. 308–316. DOI: 10.1080/19336918.2015.1005469

43. Torok N.J., Dranoff J.A., Schuppan D., Friedman S.L. Strategies and endpoints of antifibrotic drug trials: Summary and recommendations from the AASLD Emerging Trends Conference, Chicago, June 2014. *Hepatology*, 2015, vol. 62, no. 2, pp. 627–634. DOI: 10.1002/hep.27720

44. Goh Y.P.S., Henderson N.C., Heredia J.E., Eagle A.R., Odegaard J.I., Lehwald N., Nguyen K.D., Sheppard D. [et al.]. Eosinophils secrete IL-4 to facilitate liver regeneration. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 2013, vol. 110, no. 24, pp. 9914–9919. DOI: 10.1073/pnas.1304046110

45. Yang Y., Xu L., Atkins C., Kuhlman L., Zhao J., Jeong J.-M., Wen Y., Moreno N. [et al.]. Novel IL-4/HB-EGF-dependent crosstalk between eosinophils and macrophages controls liver regeneration after ischaemia and reperfusion injury. *Gut*, 2024, vol. 73, no. 9, pp. 1543–1553. DOI: 10.1136/gutjnl-2024-332033

46. Michalopoulos G.K., Bhushan B. Liver regeneration: biological and pathological mechanisms and implications. *Nat. Rev. Gastroenterol. Hepatol.*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 40–55. DOI: 10.1038/s41575-020-0342-4

47. Attarilar S., Yang J., Ebrahimi M., Wang Q., Liu J., Tang Y., Yang J. The Toxicity Phenomenon and the Related Occurrence in Metal and Metal Oxide Nanoparticles: A Brief Review From the Biomedical Perspective. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 2020, vol. 8, pp. 822. DOI: 10.3389/fbioe.2020.00822

Sutunkova M.P., Minigalieva I.A., Panov V.G., Makhorina T.V., Unesikhina M.S., Shelomentsev I.G., Sakhautdinova R.R. On assessing the potential risk of dose-dependent hepatotoxic effects of selenium oxide nanoparticles. Health Risk Analysis, 2025, no. 2, pp. 114–125. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.10.eng

Получена: 20.03.2025
Одобрена: 21.05.2025
Принята к публикации: 22.06.2025

УДК 613.955
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.11

Читать онлайн

Научная статья

ОБЩИЕ ИММУНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ МОДИФИКАЦИИ У ДЕТЕЙ ПРОТИВОИНФЕКЦИОННОГО ИММУНИТЕТА И АЛЛЕРГИЧЕСКОЙ РЕАКТИВНОСТИ, АССОЦИИРОВАННЫЕ С ОСОБЕННОСТЯМИ СОВРЕМЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА И КАЧЕСТВОМ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ

Н.В. Зайцева, С.Л. Валина, О.Ю. Устинова, И.Е. Штина, О.А. Маклакова

Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения, Российская Федерация, 614045, г. Пермь, ул. Монастырская, 82

Актуальность исследования обусловлена общностью гуморальных и клеточных механизмов и высокой чувствительностью иммунного ответа к факторам современной школьной среды при формировании противоинфекционной защиты и аллергических болезней. Объектами исследования являлись средние общеобразовательные школы с углубленным изучением предметов (СОШ с УИП) и типовые (типовые СОШ), 842 учащихся СОШ с УИП группы наблюдения и 540 учащихся типовых СОШ группы сравнения.

Установлены условия и общие патогенетические звенья иммунологических механизмов модификации противоинфекционного иммунитета и аллергической реактивности, связанной с воздействием факторов среды обитания и образовательного процесса.

Проанализирован режим образовательной деятельности СОШ, продуктовый набор и химический состав суточного рациона, основные аспекты образа жизни, качество воздуха учебных помещений, атмосферного воздуха территорий расположения СОШ, распространенность аллергических заболеваний (АЗ), нарушений противоинфекционного иммунитета, результаты иммунологических, химико-аналитических исследований крови, напряженность гуморального постинфекционного и поствакцинального иммунитета. Выполнен расчет отношения шансов, линейный регрессионный анализ, нейросетевое моделирование.

В результате установлено, что в условиях высокой учебной нагрузки, нарушений продолжительности перемен и работы с электронными средствами обучения, сна, физической и цифровой активности школьников, содержания в атмосферном воздухе территорий расположения и воздухе учебных помещений марганца, никеля, хрома, формальдегида до 1,8–8,5 раза выше $RfC_{хр}$, нерационального питания у школьников увеличивается риск развития АЗ в 1,3 раза, недостаточной выработки IgG к герпесвирусам – в 2,3 раза, повышения доли серонегативных лиц к антигенам кори и дифтерии – в 3,1–5,4 раза (OR = 1,33–5,40). Общими патогенетическими звеньями иммунологических механизмов модификации противоинфекционного иммунитета и аллергической реактивности в условиях воздействия комплекса приоритетных факторов является активация клеточно-опосредованных реакций адаптивного иммунного ответа (увеличение CD3+-, CD3+CD25+-, CD3+CD8+- лимфоцитов) и снижение активности системы неспецифической резистентности (снижение абсолютного фагоцитоза, фагоцитарного индекса, CD16+56+- лимфоцитов). Изолированный вклад в вероятность развития риск-ассоциированных АЗ особенностей современного образовательного процесса достигает 35,7–74,0 %, химических факторов – 7,6–33,1 %, образа жизни – 7,6–31,2 %; вклад в вероятность нарушений гуморального постинфекционного и поствакцинального иммунитета факторов питания – 14,6–44,0 %, образовательного процесса – 13,5–30,8 %, образа жизни – 11,4–29,4 %, химических факторов – 6,5–19,9 %.

Ключевые слова: *школьники, постинфекционный и поствакцинальный иммунитет, аллергические заболевания, иммунологические механизмы модификации, нейросетевое моделирование, вклад факторов.*

© Зайцева Н.В., Валина С.Л., Устинова О.Ю., Штина И.Е., Маклакова О.А., 2025

Зайцева Нина Владимировна – академик РАН, доктор медицинских наук, профессор, научный руководитель (e-mail: znv@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-25-34; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2356-1145).

Валина Светлана Леонидовна – кандидат медицинских наук, заведующий отделом гигиены детей и подростков (e-mail: valina@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-27-92; ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1719-1598).

Устинова Ольга Юрьевна – доктор медицинских наук, заместитель директора по клинической работе (e-mail: ustinova@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 219-87-18; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9916-5491).

Штина Ирина Евгеньевна – кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией комплексных проблем здоровья детей с клинической группой (e-mail: shtina_irina@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-30-70; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5017-8232).

Маклакова Ольга Анатольевна – доктор медицинских наук, заведующий консультативно-поликлиническим отделением (e-mail: olga_mcl@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 219-87-23; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9574-9353).

Согласно Указу Президента РФ от 18.06.2024 № 529, превентивная и персонализированная медицина, обеспечение здорового долголетия являются одним из приоритетных направлений научно-технологического развития[1].

Здоровье школьников находится в прямой зависимости от условий и организации обучения в образовательных учреждениях, количественной и качественной структуры питания, двигательной активности, оптимального чередования учебной нагрузки и отдыха, уровня и структуры цифровой активности, условий семейного воспитания [1, 2].

В настоящее время не вызывает сомнения тот факт, что ведущая роль в поддержании гомеостаза организма принадлежит иммунной системе, при этом характер ее функционирования может выходить за пределы физиологических параметров, формируя иммунопатологические процессы, реализующие генетически детерминированные программы под влиянием различных факторов среды обитания [3, 4].

Несмотря на то что хронические, вызванные стрессом и антропогенные заболевания постепенно вытесняют инфекционные болезни, в последнее десятилетие отмечен рост заболеваемости «побежденными» инфекциями, что вызвало новый интерес к проблеме устойчивости в современных условиях специфического иммунитета против вирусов и бактерий, сформированного при вакцинации [5, 6].

Долгосрочные наблюдения в ряде стран Европы свидетельствуют об удвоении показателя распространенности аллергических заболеваний (АЗ) каждые десять лет, что позволяет характеризовать аллергию как пандемический процесс [7, 8]. Установлено, что у детей с АЗ наблюдаются существенные изменения в гуморальном иммунитете при вакцинальном процессе, по сравнению со здоровыми детьми, заключающиеся в снижении интенсивности продукции антител и накопления высокозащитных специфических иммуноглобулинов, быстрой утрате поствакцинального иммунитета. В то же время известно, что дети, страдающие аллергопатологией, особенно нуждаются в защите от инфекций, которые не только усиливают и пролонгируют аллергический процесс, детерминируя каскад иммунных реакций, но и выступают в качестве триггеров АЗ [9–11].

Результаты эпидемиологических исследований и данные медицинской статистики свидетельствуют, что процент инфицированности хроническими инфекциями, а также их персистенции у пациентов, страдающих АЗ, значительно выше, чем в основной когорте детей, не имеющих признаков аллергической патологии [12, 13]. Спектр инфекционных агентов разнообразен, но лидирующие позиции занимают, как правило, вирусы. Герпесвирусные инфекции сохраняют приоритетность как междисциплинарная проблема практического здравоохранения в связи с высокой инфицированностью населения одним или чаще несколькими герпесвирусами человека (вирус простого герпеса (ВПГ) 1-го и 2-го типов; вирус варицелла-зостер, вирус Эпштейна – Барр, цитомегаловирус, вирус герпеса человека 6-го типа), обладающими способностью вызывать иммунотропные эффекты [14].

В настоящее время общепринятым является представление о ведущей роли дисбаланса субпопуляций Th1/Th2-хелперных Т-лимфоцитов в патогенезе хронических инфекций, поствакцинального иммунитета, АЗ. Преобладание Th2-иммунного ответа у страдающих аллергопатологией характеризуется продукцией цитокинов IL-4, IL-5, IL-10, IL-13, индуцированием синтеза IgE и снижением уровня интерферона-γ, что способствует снижению противовирусной защиты и длительной персистенции вирусов. Общность гуморальных и клеточных механизмов иммунного ответа является основой коморбидности аллергических и инфекционных заболеваний, нарушений формирования специфического иммунитета на вакцинацию [15]. Среди причин недостаточной эффективности глобальной борьбы на пути к решению проблем как элиминации вакциноуправляемых инфекций, так и снижения заболеваемости АЗ указывается, кроме внутренних факторов, обусловленных особенностями индивидуума, группа внешних факторов. Промышленные и транспортные выбросы, изменение «стиля жизни», характера питания, интенсификация образовательной деятельности, стресс играют значительную роль в изменении иммунологической реактивности [16–18].

В связи с тем что современная школьная среда выступает в качестве многокомпонентной динамической системы, особое значение в актуальных условиях приобретает установление факторов и биомаркеров, коррелирующих со степенью вакциноиндуцированного, постинфекционного и аллергического иммунного ответа [19, 20].

Таким образом, вопросы сопряженности нарушений противоинфекционного иммунитета и аллергической реактивности у детей и подростков остаются областью интенсивного изучения, в первую очередь, в связи с высокой чувствительностью иммунной системы к внешним воздействиям, необходимостью разработки методов прогнозирования силы иммунного ответа, а также мероприятий по выявлению, устранению или ослаблению неблагоприятного влияния актуальных факторов риска.

Цель исследования – установить условия и общие патогенетические закономерности иммунологических механизмов модификации у школьников противоинфекционного иммунитета и аллергической реактивности, связанной с воздействием факторов среды обитания и образовательного процесса.

Материалы и методы. В статье использованы материалы исследований, реализованных за период 2019–2024 гг. в рамках НИР в соответствии с отраслевой научно-исследовательской программой Роспотребнадзора, выполненных с соблюдением действующих принципов медицинской этики, одобренных локальным этическим комитетом ФБУН «Федераль-

[1] Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий: Указ Президента Российской Федерации от 18.06.2024 № 529 [Электронный ресурс] // Президент России. – URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/50755 (дата обращения: 10.04.2025).

ный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» (протоколы заседаний ЛЭК № 3 от 01.03.2019, № 1 от 06.02.2020, № 1 от 04.02.2021, № 3 от 17.02.2022, № 3 от 14.02.2023). Объектами исследования являлись средние общеобразовательные школы с углубленным изучением предметов (СОШ с УИП) и типовые школы (типовые СОШ); проведено углубленное клинико-лабораторное обследование 1382 учащихся начальных, средних и старших классов исследуемых СОШ. Группу наблюдения составили 842 учащихся СОШ с УИП, с медианой возраста 12 (10; 15) лет; группу сравнения – 540 учащихся типовых СОШ (медиана возраста – 12 (9; 15) лет).

Сравнительная оценка соответствия режимов образовательной деятельности СОШ с различной направленностью программ обучения требованиям санитарного законодательства[2] выполнена на основании данных анализа расписания звонков и уроков, результатов хронометража времени работы с электронными средствами обучения (ЭСО) в школе.

Анализ продуктового набора, сформированного у обучающихся, осуществлен путем сравнения усредненных данных «Дневников питания» с рекомендуемыми среднесуточными наборами пищевых продуктов[3]. По результатам расчета химического состава и калорийности суточного рациона школьника с использованием данных справочника[4] определена степень удовлетворения рациона средней суточной потребности в основных пищевых веществах и энергии (Приложение № 10 СанПиН 2.3/2.4.3590-20[3]).

Изучение социально-экономического статуса семей школьников, вовлеченности в систему дополнительного образования (ДО), режимных моментов, физической и цифровой активности основывалось на данных авторской анкеты.

Химико-аналитическое исследование качества воздуха учебных помещений, атмосферного воздуха территорий расположения исследуемых СОШ, а также крови на содержание марганца, никеля, хрома, формальдегида, бензола, толуола выполнено специалистами отдела химико-аналитических методов исследования ФБУН «ФНЦ медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» в 2019–2024 гг. в соответствии с методическими указаниями[5].

---

[2] СП 2.4.3648-20. Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи / утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.09.2020 г. № 28; введ. в действие с 01.01.2021 г. [Электронный ресурс] // ГАРАНТ: информационно-правовое обеспечение. – URL: https://base.garant.ru/75093644/ (дата обращения: 11.04.2025); СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания (с изменениями на 30 декабря 2022 года) / утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года № 2; введ. в действие с 01.03.2021 г. [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/573500115 (дата обращения: 11.04.2025).

[3] СанПиН 2.3/2.4.3590-20. Санитарно-эпидемиологические требования к организации общественного питания населения (с изменениями на 22 августа 2024 года) / утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 27 октября 2020 года № 32; введ. в действие с 01.01.2021 г. [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/566276706 (дата обращения: 11.04.2025).

[4] Тутельян В.А. Химический состав и калорийность российских продуктов питания: справочник. – М.: ДеЛи плюс, 2012. – 284 с.

[5] МУК 4.1.1045-01. ВЭЖХ определение формальдегида и предельных альдегидов (C_2-C_{10}) в воздухе: методические указания / утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации - Первым заместителем Министра здравоохранения Российской Федерации Г.Г. Онищенко 5 июня 2001 г. [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200029341 (дата обращения: 11.04.2025); МУК 4.1.3167-14. Газохроматографическое определение гексана, гептана, бензола, толуола, этилбензола, м-,о-,п-ксилолов, изопропилбензола, н-пропилбензола, стирола, метилстирола, бензальдегида в атмосферном воздухе, воздухе испытательной камеры и замкнутых помещений: методические указания / утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 16 июня 2014 г. [Электронный ресурс] // ГАРАНТ: информационно-правовое обеспечение. – URL: https://base.garant.ru/72079584/ (дата обращения: 11.04.2025); МУК 4.1.3481-17. Измерение массовых концентраций химических элементов в атмосферном воздухе методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой: методические указания / утв. Руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом РФ 15.06.2017 [Электронный ресурс] // МЕГАНОРМ: система нормативных документов. – URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/metodicheskie-ukazaniya/0/muk_4_1_3481-17_4_1_metody_kontrolya_khimicheskie_faktory.html (дата обращения: 11.04.2025); МУК 4.1.2111-06. Измерение массовой концентрации формальдегида, ацетальдегида, пропионового альдегида, масляного альдегида и ацетона в пробах крови методом высокоэффективной жидкостной хроматографии: методические указания / утв. Руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации Г.Г. Онищенко 9 августа 2006 г. [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200065243 (дата обращения: 11.04.2025); МУК 4.1.765-99. Газохроматографический метод количественного определения ароматических углеводородов (бензол, толуол, этилбензол, о-,м-,п-ксилол) в биосредах (кровь): методические указания / утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации Г.Г. Онищенко 6 июля 1999 г. [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200039012 (дата обращения: 11.04.2025); МУК 4.1.3230-14. Измерение массовых концентраций химических элементов в биосредах (кровь, моча) методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой: методические указания / утв. Руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации А.Ю. Поповой 19 декабря 2014 г. [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/495856222 (дата обращения: 11.04.2025).

Диагностика АЗ – аллергический ринит (АР), бронхиальная астма (БА), атопический дерматит (АД) – проведена на основании данных «Медицинской карты ребенка для образовательных учреждений» (форма № 026/у-2000) и углубленного клинико-лабораторного обследования. Нарушения противоинфекционного иммунитета определены по клинико-лабораторным критериям, в том числе по уровню IgG к герпес-вирусной инфекции, вызванной вирусами простого герпеса 1-го типа (герпетическая инфекция ВПГ-1) и 5-го типа (цитомегаловирусная инфекция – ЦМВИ) (постинфекционный иммунитет), а также по напряженности специфического гуморального иммунного ответа на вакцинные антигены кори, дифтерии, коклюша (поствакцинальный иммунитет).

Для обработки полученного материала использовались общепринятые статистические методики с определением абсолютных, относительных и медианных значений. Для оценки риска рассчитывали отношение шансов *OR* и его 95%-ный доверительный интервал. С помощью логистической регрессии оценивали вероятность развития АЗ, нарушений гуморального иммунитета к инфекциям, управляемым средствами специфической профилактики, а также изменения иммунологических показателей при воздействии актуальных факторов риска.

Для выявления более глубоких, с учетом взаимовлияния, причинно-следственных связей между вероятностью снижения гуморального поствакцинального, постинфекционного иммунитета и факторами риска; вероятностью изменения иммунологических показателей и рассматриваемыми факторами; вероятностью снижения противоинфекционного гуморального иммунитета и показателями иммунитета применен метод построения искусственных нейронных сетей с использованием библиотеки neuralnet в программном продукте R-studio. Для количественной оценки качества прогнозирования построенных нейросетевых моделей использовался коэффициент детерминации, рассчитываемый как квадрат коэффициента корреляции между прогнозируемыми и фактическими значениями. Для оценки чувствительности нейросетевых моделей и выявления приоритетных факторов использованы коэффициенты эластичности, которые показывают относительное изменение отклика на выходном слое при относительном изменении входных показателей на первом слое нейронов. На основе интегральных коэффициентов эластичности были определены итоговые вклады факторов, влияющих на уровень постинфекционных и поствакцинальных антител.

Результаты и их обсуждение. Анализ организации образовательного процесса показал, что продолжительность больших и малых перемен в ряде исследуемых школ сокращена относительно нормативов в 1,3–2 раза, составив в среднем в СОШ с УИП 16,87 ± 0,47 и 8,8 ± 0,36 мин соответственно против 18,0 ± 0,53 и 9,4 ± 0,31 мин в типовых СОШ (p = 0,060–0,130). Превышение максимальной допустимой недельной учебной нагрузки в СОШ с УИП составило 5,5–19,2 %. Время использования персонального компьютера (ПК) и интерактивной доски (ИД) на уроке в СОШ с УИП превышало допустимые значения в 1,2–2,2 раза и аналогичные показатели в типовых СОШ – в 1,4–2,6 раза. Кратность превышения дневной суммарной продолжительности использования ЭСО относительно нормативов достигала 1,4, а показателя группы сравнения – 2,5 раза.

Результаты исследования характера питания школьников свидетельствуют о негативных тенденциях в структуре суточного рациона всех обследованных детей, при этом в СОШ с УИП кратность снижения потребления относительно норм обеспечения молока, кисломолочных продуктов, творога, масла, мяса, рыбы составила 1,5–8,4 раза, овощей и фруктов свежих – 1,3–4,7, яиц – 5,2–10,0, круп и бобовых – до 1,6, хлеба пшеничного – до 4,9 раза (p < 0,001–0,007); установлен избыток потребления макаронных (в 1,2–1,7 раза) и кондитерских изделий (в 6,1–12,3 раза) (p < 0,001–0,022). По химическому составу среднесуточный рацион школьников группы наблюдения характеризуется снижением относительно потребности фактического содержания белков, жиров, углеводов в 1,2–2 раза; дефицитом поступления с пищей кальция, фосфора и магния (в 1,2–1,4 раза); снижением до 1,2 раза поступления с пищей витамина B_1 и А; увеличением в 1,5 раза в возрастной динамике недостатка поступления витамина B_2; снижением относительно группы сравнения калорийности в 1,3 раза (p < 0,001).

В ходе анализа социально-экономического статуса семей обследованных школьников установлено, что в каждой второй семье учащихся типовых СОШ ежемесячный доход на одного члена семьи не превышал 15 000 рублей, в СОШ с УИП доля таких семей составила только 26,8 %, у 30,4 % размер дохода составил от 15 001 до 30 000 рублей (p < 0,001). Среди обучающихся в СОШ с УИП в 1,4 раза больше детей, участвующих в системе дополнительного образования (85,6 против 60,3 %, p < 0,001). Продолжительность ночного сна менее 8 ч установлена по данным анкеты у 17,3 % учащихся СОШ с УИП и у 18,4 % типовых СОШ (p = 0,057). Уделяют физкультуре и спорту один день в неделю и менее и менее 6 ч в неделю 11 и 66,7 % школьников СОШ с УИП соответственно и 18,6 и 77,6 % – типовых СОШ (p = 0,002–0,04). Изучение цифровой активности показало, что доли детей, взаимодействующих с 3 девайсами и более, и у которых среднесуточное экранное время превышает 2 ч, составили в СОШ с УИП 33,1 и 77,6 % соответственно, в типовых СОШ – 22,1 и 66,5 % соответственно (p = 0,011–0,045).

На основании результатов гигиенической оценки качества атмосферного воздуха территорий расположения исследуемых образовательных организаций установлено, что средние значения содер-

жания марганца и формальдегида до 1,8–8,5 раза превышали референтные концентрации при хроническом ингаляционном воздействии ($p < 0,005$). В единичных пробах атмосферного воздуха территорий наблюдения и сравнения зарегистрировано превышение до 3,6 раза $RfC_{хр}$ по содержанию никеля и хрома ($p < 0,005$).

Анализ проб воздуха, отобранных в учебных помещениях исследуемых образовательных организаций, показал, что средние значения содержания марганца в некоторых школах и формальдегида в большинстве школ до 1,9–6,4 раза превышали $RfC_{хр}$ ($p < 0,005$). В единичных пробах воздуха учебных помещений СОШ с УИП и типовых СОШ никель и хром регистрировались в концентрациях, превышающих $RfC_{хр}$ в 1,1–1,5 раза ($p < 0,005$). Содержание бензола и толуола в атмосферном воздухе территорий расположения и воздухе учебных помещений исследуемых образовательных организаций не превышало максимальных разовых и среднесуточных ПДК и было ниже $RfC_{хр}$.

Согласно данным химико-аналитических исследований крови, у 46,0 % обследованных детей обнаружено присутствие бензола и толуола, причем у школьников группы наблюдения толуол регистрировался в 1,2 раза чаще, а среднегрупповые концентрации ароматических углеводородов были статистически значимо выше, чем у детей группы сравнения ($p = 0,0001–0,002$). Содержание формальдегида в крови 97,9–98,6 % обследованных школьников превышало фоновый уровень, среднегрупповые значения были выше фонового уровня в 3,4–4,3 раза ($p < 0,005$). В группе наблюдения у 3/4 школьников зарегистрировано содержание в крови никеля и хрома выше фоновых показателей и в 1,2 раза более высокая относительно группы сравнения доля детей с повышенным уровнем марганца в крови ($p = 0,006–0,013$).

Установленные в результате моделирования статистически значимые зависимости содержания марганца, никеля, хрома, формальдегида, толуола, бензола в крови от дозы химических соединений, поступающей из атмосферного воздуха ($0,16 \le R^2 \le 0,50$; $31,97 \le F \le 214,88$; $p < 0,005$), позволили повышенное содержание в крови этих компонентов оценивать как маркеры экспозиции.

Сравнительный анализ распространенности АЗ и нарушений противоинфекционного иммунитета по результатам клинико-лабораторных исследований показал, что при отсутствии статистически значимых межгрупповых различий в пределах трех уровней образования ($p = 0,146–0,971$) у учащихся СОШ с УИП за период обучения в школе наблюдалась тенденция к росту в 1,4 раза АЗ (с 162 до 228 случаев на 1000 осмотренных, $p = 0,042$; $OR = 1,33$; $DI = 1,02–1,74$) и отсутствие значимой положительной динамики в распространенности нарушений противоинфекционного иммунитета ($p = 0,084$), в то время как в группе сравнения регистрировалось снижение в 2,4 раза (со 124 до 51 случая на 1000 осмотренных, $p = 0,029$).

В ходе оценки постинфекционного иммунитета против герпесвирусов установлено, что у школьников СОШ с УИП высокая напряженность серологического ответа (титры IgG: 1: 800–3200) к ЦМВИ и герпетической инфекции ВПГ-1 регистрировалась в 1,2–1,6 раза реже относительно показателей группы сравнения (26 против 43 % и 53,5 против 63,2 % соответственно, $p = 0,002–0,068$), недостаточная выработка IgG (титры: 1: 100–400) к ЦМВИ наблюдалась в 1,9 раза чаще, чем в группе сравнения (32,6 против 17,5 %, $p = 0,002$; $OR = 2,30$; $DI = 1,76–2,99$).

Анализ специфического иммунного ответа на вакцинные антигены в возрастной динамике показал, что в СОШ с УИП в старших классах относительно аналогичных показателей в младших классах доля серопозитивных лиц к вирусу кори уменьшилась в 1,2 раза (с 74,4 до 60,8 %, $p = 0,03$; в типовых СОШ – с 77,2 до 75,4 %, $p = 0,790$), а количество школьников с отрицательным результатом увеличилось в 2,5 раза (с 12,3 до 30,5 %, $p < 0,005$; $OR = 3,11$; $DI = 1,88–5,36$; в типовых СОШ – с 11,9 до 13,8 %, $p = 0,720$). Показатель отсутствия защитных антител к дифтерии у учащихся СОШ с УИП в средних классах по сравнению с показателем в начальных классах увеличился в 5,0 раза (с 2,7 до 13,4 %, $p = 0,003$; $OR = 5,40$; $DI = 2,79–11,14$; в типовых СОШ – с 1,5 до 3,7 %, $p = 0,120$), при этом произошло в 1,25 раза более интенсивное снижение доли детей с протективным уровнем в старших классах относительно таких детей в младших классах (с 79,5 до 40,0 %, $p < 0,005$; в типовых СОШ – с 64,2 до 40,3 %, $p = 0,007$). Интенсивность снижения доли лиц, серонегативных к возбудителю коклюша, в старших классах относительно показателей в младших классах среди обучающихся в СОШ с УИП была в 1,2 раза меньше, чем в типовых СОШ (с 34,5 до 23,8 %, $p = 0,090$ против с 32,9 до 19,3 %, $p = 0,040$).

В ранее опубликованных статьях были представлены результаты регрессионного анализа по установлению влияния ненормативных уровней факторов образовательного процесса, питания, образа жизни, контаминации биосред химическими соединениями на вероятность развития АР и снижения гуморального иммунитета к дифтерии и коклюшу [21, 22]. Связи между рассматриваемыми факторами и заболеваемостью БА и АД, установленные в результате построения однофакторных регрессионных логистических моделей, продемонстрированы в табл. 1.

Приоритетными факторами образовательного процесса, от которых зависит уровень заболеваемости АЗ, являются недельная образовательная нагрузка ($R^2_{АР,\ АД} = 0,19–0,47$); продолжительность использования ИД и ПК на уроке и суммарно в день в школе ($R^2_{АР,\ АД,\ БА} = 0,30–0,82$). Установлено дозозависимое влияние продолжительности малых перемен на уровень IgG к возбудителю коклюша ($R^2 = 0,17$).

Таблица 1

Параметры однофакторных линейных регрессионных моделей зависимости развития БА и АД от приоритетных факторов риска

Фактор		Ответ	*b0*	*b1*	R^2	*F*	*p*
Образовательный процесс	Недельная образовательная нагрузка	АД	-8,98	0,22	0,47	59,4	< 0,001
	Продолжительность использования ИД на уроке	АД	-2,84	0,05	0,73	210	< 0,001
		БА	-1,68	0,02	0,58	53,5	< 0,001
	Продолжительность использования ИД суммарно в день в школе	АД	-2,69	0,04	0,82	108	< 0,001
	Продолжительность использования ПК на уроке	АД	-2,63	0,02	0,30	5,81	< 0,001
		БА	-2	0,02	0,79	143,7	< 0,001
	Продолжительность использования ПК суммарно в день в школе	АД	-2,77	0,04	0,36	44,7	< 0,001
Питание	Потребление хлеба пшеничного	АД	-0,16	0	0,27	78,9	< 0,001
	Потребление кондитерских изделий	БА	-3,22	0,01	0,55	111	< 0,001
	Потребление птицы	БА	-2,40	0,01	0,39	77,3	< 0,001
Образ жизни	Периодичность занятий физкультурой, спортом	АД	-0,26	-0,13	0,68	369,37	< 0,001
		БА	-1,93	-0,09	0,63	303,54	< 0,001
	Продолжительность занятий физкультурой, спортом	АД	-0,54	-0,06	0,25	56,90	< 0,001
	Количество используемых девайсов	АД	-0,69	0,04	0,10	29,3	< 0,001
Химические факторы	Содержание в крови бензола	БА	-2,31	99,68	0,17	68,47	< 0,001
		АД	-0,80	309,70	0,35	197,06	< 0,001
	Содержание в крови толуола	БА	-2,47	364,55	0,15	28,6	0,005
		АД	-1,65	118,65	0,15	31,7	0,0002
	Содержание в крови марганца	БА	-3,08	43,37	0,10	45,80	< 0,001
		АД	-2,34	83,11	0,31	61,17	< 0,001
	Содержание в крови никеля	АР	-0,70	56,55	0,18	89,89	< 0,001
		БА	-2,96	102,70	0,33	203,19	< 0,001
		АД	-1,60	45,06	0,19	65,0	< 0,001
	Содержание в крови формальдегида	БА	-3,14	18,96	0,67	848,95	< 0,001

Актуальными факторами питания в отношении модификации у детей поствакцинального иммунитета и аллергической реактивности выступает уровень потребления молока ($R^2_{АР} = 0,64$; $R^2_{дифтерия} = 0,65$), хлеба пшеничного ($R^2_{АР,\ АД} = 0,27–0,66$), мяса ($R^2_{дифтерия,\ коклюш} = 0,21–0,34$), рыбы, яиц, кисломолочных продуктов ($R^2_{коклюш} = 0,60–0,96$), кондитерских изделий ($R^2_{БА} = 0,55$), птицы ($R^2_{БА,\ АР} = 0,39$; $R^2_{дифтерия} = 0,86$).

Из проанализированных аспектов образа жизни для изменения уровня заболеваемости аллергическими болезнями и поствакцинального гуморального иммунитета наиболее актуальными явились периодичность ($R^2_{АР,\ БА,\ АД} = 0,19–0,68$) и продолжительность занятий физкультурой и спортом ($R^2_{АД} = 0,25$); количество используемых девайсов ($R^2_{АД} = 0,10$).

Приоритетными химическими факторами, влияние которых на модификацию поствакцинального иммунитета и аллергической реактивности подтверждено в результате построения регрессионных моделей, являются содержание в крови толуола ($R^2_{БА,\ АД,\ АР} = 0,15–0,64$), бензола ($R^2_{БА,\ АД,\ АР} = 0,17–0,35$), марганца ($R^2_{БА,\ АР,\ АД} = 0,10–0,31$; $R^2_{коклюш,\ дифтерия} = 0,19–0,40$), никеля ($R^2_{АР,\ АД,\ БА} = 0,18–0,33$; $R^2_{дитерия} = 0,78$); хрома ($R^2_{АР} = 0,58$; $R^2_{дифтерия} = 0,12$), формальдегида ($R^2_{БА} = 0,67$).

С целью выявления более глубоких связей и количественной оценки вкладов факторов окружающей среды, современного образовательного процесса, питания и образа жизни в формирование противоинфекционного (постинфекционного и поствакцинального) иммунитета был дополнительно применен метод построения искусственных нейронных сетей. Машинное обучение искусственных нейронных сетей, широко применяемое в последнее время в России и за рубежом, представляется одним из эффективных методов определения качественных и количественных закономерностей формирования иммунологической реактивности с учетом взаимовлияния множества факторов [23, 24]. Полученные нейросетевые модели характеризуются внешним входным слоем, соразмерным количеству исследуемых факторов, внутренними слоями и выходным слоем, соответствующим вероятности снижения уровня IgG к герпетической инфекции ВПГ-1 и ЦМВИ (постинфекционный иммунитет), а также к вирусу кори, токсину дифтерии и антигену коклюша (поствакцинальный иммунитет). Направленность влияния идентифицировалась в ходе численного эксперимента, заключавшегося в последовательном увеличении каждого фактора риска на 1 %, и последующего прогнозирования изменения вероятности

развития нарушений формирования поствакцинального и постинфекционного иммунитета (герпетическая инфекция ВПГ-1 и цитомегаловирусная инфекция). Ранжирование факторов риска, определяющих дополнительную вероятность снижения уровня IgG к герпетической инфекции ВПГ-1 и ЦМВИ, представлено в табл. 2.

По данным нейросетевого моделирования вероятность изменения выработки специфических антител к герпетической инфекции ВПГ-1 и ЦМВИ модифицируется при изменении на 1 % показателей современного образовательного процесса – до 26,75 и 17,68 % соответственно; питания – до 5,73 и 3,05 %; окружающей среды – до 20,08 и 23,82 %; образа жизни – до 60,43 и 6,22 % соответственно (см. табл. 2).

Наиболее выраженное модифицирующее действие на вероятность отклонения от протективного уровня выработки специфических антител к вирусу кори оказывает изменение таких факторов образовательного процесса, как недельная учебная нагрузка (до 99,38 %), к возбудителю коклюша – продолжительность малых перемен (до 70,5 %), к дифтерийному анатоксину – продолжительность больших перемен (до 82,71 %) (табл. 3).

Вероятность снижения выработки специфических антител к вирусу кори модифицируется факторами питания до 797,65 % (потребление кондитерских изделий), к возбудителю коклюша – до 45,6 % (потребление рыбы), к дифтерийному анатоксину – до 58,75 % (потребление мяса). Приоритетными химическими факторами риска окружающей среды,

Таблица 2

Результаты нейросетевого моделирования влияния приоритетных факторов риска на формирование гуморального постинфекционного иммунитета, %

Фактор		Изменение вероятности снижения IgG к ВПГ-1 (layers 9; 5, R^2 = 0,144)	Изменение вероятности снижения IgG к ЦМВИ (layers 14; 7, R^2 = 0,233)
Образовательный процесс	Продолжительность больших перемен	26,75	17,68
	Продолжительность малых перемен	3,99	16,58
	Недельная учебная нагрузка	14,95	2,43
	Продолжительность использования ПК на уроке	3,21	3,45
	Продолжительность использования ИД на уроке	1,44	2,30
Питание	Содержание молока в среднесуточном наборе пищевых продуктов	4,77	2,12
	Содержание кондитерских изделий в среднесуточном наборе	3,69	0,73
	Содержание круп, бобовых в среднесуточном наборе	3,66	0,26
	Содержание макаронных изделий в среднесуточном наборе	3,64	0,26
	Содержание кисломолочных продуктов в среднесуточном наборе	3,61	0,90
	Содержание рыбы в среднесуточном наборе	3,08	0,36
	Содержание овощей свежих в среднесуточном наборе	3,06	1,32
	Содержание белков в суточном рационе	5,73	0,40
	Содержание витамина B_1 в суточном рационе	4,18	0,10
	Содержание витамина B_2 в суточном рационе	1,50	1,67
	Содержание Ккал в суточном рационе	3,29	3,05
Окружающая среда	Содержание марганца в атмосферном воздухе	20,08	15,68
	Содержание никеля в атмосферном воздухе	3,76	6,97
	Содержание хрома в атмосферном воздухе	3,62	0,78
	Содержание толуола в атмосферном воздухе	13,79	0,93
	Содержание бензола в атмосферном воздухе	2,04	10,15
	Содержание формальдегида в атмосферном воздухе	9,75	0,30
	Содержание никеля в воздухе учебных помещений	5,90	0,51
	Содержание толуола в воздухе учебных помещений	19,63	2,16
	Содержание бензола в воздухе учебных помещений	3,15	1,48
	Содержание формальдегида в воздухе учебных помещений	6,97	2,54
	Содержание марганца в воздухе учебных помещений	2,31	23,82
	Содержание хрома в воздухе учебных помещений	2,36	2,02
Образ жизни	Продолжительность ночного сна	60,43	0,56
	Посещение учреждений ДО	4,55	6,22
	Ежемесячный доход на одного члена семьи	5,06	3,76
	Суммарное суточное время взаимодействия с девайсами	3,72	0,33
	Продолжительность занятий физкультурой, спортом	0,37	2,25

Таблица 3

Результаты нейросетевого моделирования влияния приоритетных факторов риска на формирование гуморального поствакцинального иммунитета, %

Фактор		Изменение вероятности снижения IgG к кори (layers 5; 2, R^2=0,152)	Изменение вероятности снижения IgG к коклюшу (layers 15; 10, R^2=0,175)	Изменение вероятности снижения IgG к дифтерии (layers 10; 8, R^2=0,180)
Образовательный процесс	Продолжительность больших перемен	97,27	2,4	82,71
	Продолжительность малых перемен	56,52	70,5	55,39
	Недельная учебная нагрузка	99,38	55,2	38,66
	Продолжительность использования ПК на уроке	50,38	17,4	5,89
	Продолжительность использования ИД на уроке	22,15	10,5	9,05
	Суммарная продолжительность использования ПК в школе	58,52	13,5	2,0
	Суммарная продолжительность использования ИД в школе		12,5	2,33
Питание	Содержание молока в среднесуточном наборе	60,55	34,5	1,67
	Содержание кондитерских изделий в среднесуточном наборе	797,65	0,2	14,55
	Содержание круп, бобовых в среднесуточном наборе	95,82	11,8	1,62
	Содержание макаронных изделий в среднесуточном наборе	636,25	16,3	12,08
	Содержание кисломолочных продуктов в среднесуточном наборе	435,74	5,2	15,0
	Содержание рыбы в среднесуточном наборе	720,21	45,6	15,82
	Содержание овощей свежих в среднесуточном наборе	70,36	9,9	14,93
	Содержание фруктов свежих в среднесуточном наборе	80,87	9,8	9,29
	Содержание мяса в среднесуточном наборе	309,51	1,2	58,75
	Содержание хлеба пшеничного в среднесуточном наборе	71,78	10,6	16,4
	Содержание яиц в среднесуточном наборе	58,93	8,7	5,69
	Содержание белков в суточном рационе	410,12	12,0	5,84
	Содержание витамина B_1 в суточном рационе	10,63	0,1	6,19
	Содержание витамина B_2 в суточном рационе	11,55	3,2	3,49
	Содержание витамина А в суточном рационе	92,39	3,6	2,5
	Содержание Ккал в суточном рационе	30,85	7,4	11,62
	Содержание железа в суточном рационе	115,76	3,0	23,86
	Содержание магния в суточном рационе	27,96	6,6	21,78
Окружающая среда	Содержание марганца в атмосферном воздухе	70,71	42,2	34,89
	Содержание никеля в атмосферном воздухе	85,79	3,9	6,9
	Содержание хрома в атмосферном воздухе	59,73	7,4	14,96
	Содержание толуола в атмосферном воздухе	19,22	12,6	2,73
	Содержание бензола в атмосферном воздухе	68,78	25,5	7,2
	Содержание формальдегида в атмосферном воздухе	37,84	20,3	4,69
	Содержание никеля в воздухе учебных помещений	19,22	5,2	8,7
	Содержание толуола в воздухе учебных помещений	110,17	3,40	12,19
	Содержание бензола в воздухе учебных помещений	31,13	13,1	0,21
	Содержание формальдегида в воздухе учебных помещений	109,31	28,8	14,56
	Содержание марганца в воздухе учебных помещений	378,36	24,4	13,57
	Содержание хрома в воздухе учебных помещений	156,09	8,5	30,01
Образ жизни	Продолжительность ночного сна	89,01	101,5	26,12
	Посещение учреждений ДО	58,36	8,6	26,75
	Ежемесячный доход на одного члена семьи	72,25	3,6	62,08
	Суммарное суточное время взаимодействия с девайсами	9,92	3,3	6,93
	Продолжительность занятий физкультурой, спортом	25,26	27,3	3,7
	Периодичность занятий физкультурой, спортом	19,7	12,9	7,1

модифицирующими вероятность снижения поствакцинального гуморального иммунитета, являются: для кори – содержание марганца в воздухе учебных помещений (378,36 %), для коклюша – содержание бензола в атмосферном воздухе (25,5 %), для дифтерии – содержание марганца в атмосферном воздухе (34,89 %). Сокращение продолжительности ночного сна модифицирует вероятность отклонения от про-

тективного уровня выработки специфических антител к возбудителям кори и коклюша на 89,01 и 101,5 % соответственно, в то время как для противодифтерийного иммунитета наиболее значимым фактором образа жизни выступил ежемесячный доход на одного члена семьи (62,08 %).

Межгрупповое сравнение результатов иммунологических исследований и последующее математическое моделирование позволили установить негативные эффекты со стороны иммунной системы и патогенетические закономерности модификации у школьников противоинфекционного иммунитета и аллергической реактивности, ассоциированной с особенностями современного образовательного процесса, окружающей средой, питанием, образом жизни.

В условиях комплексного воздействия изучаемых факторов на снижение реактивности гуморального звена иммунитета указывает до 1,2 раза более низкое, при сравнении с показателем у учащихся типовых СОШ, относительное содержание CD19+-лимфоцитов (12 (10; 14) против 14 (11; 16) %, $p = 0,046$) и наличие 30,5–54,7 % детей с содержанием антител поздней фазы иммунного ответа (IgG) ниже физиологических значений.

Об активации клеточного адаптивного иммунного ответа у обучающихся СОШ с УИП свидетельствует более высокое относительное содержание CD3+-лимфоцитов (68 (64; 73) против 66 (62; 70), $p = 0,040$) и высокий уровень активированных Т-клеток (CD3+CD25+-лимфоциты) у 20,3 % детей.

Преобладание цитотоксического эффекторного механизма иммунного ответа у школьников группы наблюдения сопровождается более высоким относительным содержанием CD3+CD8+-лимфоцитов (25 (22; 23) против 23 (21; 26) %, $p = 0,023$).

Увеличение у каждого третьего–пятого школьника количества лимфоцитов с рецептором CD95 как в относительном (35,7 %), так и абсолютном значении (21,4 %) свидетельствует об усилении механизмов программируемой гибели клеток и снижении активности иммунных реакций.

Ослабление активности системы неспецифической защиты сопровождается низкими значениями абсолютного фагоцитоза у 15,6 % учащихся СОШ с УИП (против 2,0 % в типовых СОШ, $p = 0,03$), фагоцитарного числа (ФЧ) – у 40,6 % (против 33,3 %, $p = 0,236$), фагоцитарного индекса (ФИ) – у 4,4 % (против 0,9 %, $p = 0,157$), процента фагоцитоза – у 12,5 % (против 2,0 %, $p = 0,080$). Традиционно относящиеся к системе врожденного иммунитета, обеспечивающие, кроме быстрого эффекторного ответа в отношении инфицированных клеток, координацию взаимодействия врожденного и адаптивного звеньев иммунной системы натуральные киллеры (CD16+CD56+-лимфоциты) также регистрировались на более низком уровне относительно показателя в группе сравнения (10 (6; 14) против 12 (9; 17) %, $p = 0,060$).

Анализ содержания цитокинов иммунной системы, обеспечивающих межклеточную кооперацию, позитивную или негативную иммунорегуляцию, показал у школьников СОШ с УИП в 1,2 раза более высокий уровень интерферона гамма (2,02 (1,49; 2,55) против 1,75 (1,28; 2,54) пг/мл, $p = 0,595$) и более низкий в 2,5 раза уровень его антагониста – IL-4 (0,88 (0,55; 1,32) против 2,24 (0,58; 2,7) пг/мл, $p = 0,036$), что свидетельствует о приоритете развития адаптивного ответа по пути Th1.

Способствующие, как и IL-4 переходу В-лимфоцитов в антителопродуценты, IL-6 и IL-10 также регистрировались у детей группы наблюдения на более низком уровне (1,48 (1,18; 2,19) против 1,58 (0,85; 2,27) пг/мл и 3,18 (1,73; 4,9) против 3,27 (1,97; 4,75) пг/мл соответственно).

Способностью поддерживать провоспалительную активность моноцитов / макрофагов и содействовать развитию иммунных реакций, опосредуемых Т-хелперами 1-го типа, обладает IL-8, уровень которого у 21,4 % школьников СОШ с УИП превышал физиологическое значение.

Кратность снижения у детей группы наблюдения содержания фактора некроза опухолей (ФНО), способствующего пролиферации и дифференцировке Т-хелперов и В-лимфоцитов, образованию антител, стимулирующего фагоцитоз, составила 1,2 раза относительно соответствующего показателя в типовых СОШ (1,94 (1,28; 2,29) против 2,31 (1,74; 2,73) пг/мл, $p = 0,008$).

Продукция интерлейкина-1-бета (IL-1ß), обладающего свойством стимулировать Т- и В-клетки, и IL-17, обеспечивающего активацию и миграцию нейтрофилов, стимулирующего выработку IL-1β, фактора некроза опухоли и IL-6 моноцитами периферической крови, а также способного негативно и позитивно регулировать синтез IgE и влиять на формирование и течение аллергических заболеваний, в условиях воздействия комплекса рассматриваемых факторов была снижена в группе наблюдения в 1,8 раза относительно группы сравнения (1,53 (0,88; 2,63) против 2,75 (1,44; 3,23) пг/мл, $p = 0,049$ и 1,13 (0,72; 4,02) против 1,67 (1,05; 3,18) пг/мл, $p = 0,543$ соответственно).

В результате построения однофакторных регрессионных логистических моделей установлена связь негативных лабораторных эффектов со стороны иммунной системы с актуальными факторами современного образовательного процесса, среды обитания (табл. 4).

Установлена зависимость относительного содержания CD16+56+-лимфоцитов от всех групп изучаемых факторов: питания ($R^2 = 0,53$), химических факторов ($R^2 = 0,10–0,24$), образа жизни ($R^2 = 0,16$), образовательного процесса ($R^2 = 0,10$). Некоторые аспекты образа жизни, химическая нагрузка и питание являются приоритетными факторами риска, от которых зависит уровень IgG ($R^2 = 0,65$, $R^2 = 0,10–0,32$ и $R^2 = 0,10–0,13$ соответственно) и относительное содержание CD3+-лимфоцитов ($R^2 = 0,10$, $R^2 = 0,10–0,87$ и $R^2 = 0,46$ соответственно). В зависимости от содер-

Таблица 4

Параметры однофакторных регрессионных логистических моделей зависимости иммунологических показателей от актуальных факторов риска

Фактор		Иммунологический показатель	Направление	*b0*	*b1*	R^2	*F*	*p*
Образовательный процесс	Продолжительность малых перемен	CD16+56+-лимф.,отн.	Ниже	-1,88	-0,064	0,10	14,33	0,002
Питание	Потребление яиц	IgG	Ниже	-1,03	-0,01	0,13	34,50	< 0,001
	Потребление кондитерских изделий	IgG	Ниже	-1,19	0,002	0,10	15,87	< 0,001
	Потребление птицы	CD3+-лимф., отн.	Выше	-4,21	0,04	0,46	162,26	< 0,001
		CD16+56+-лимф.,отн.	Ниже	-2,90	0,022	0,53	387,81	< 0,001
Образ жизни	Количество используемых девайсов	IgG	Ниже	-2,36	-0,12	0,65	811,27	< 0,001
		CD3+-лимф.,отн.	Выше	-4,15	0,11	0,10	46,96	< 0,001
		CD16+56+-лимф.,отн.	Ниже	-2,71	0,13	0,16	85,37	< 0,001
	Периодичность занятий физкультурой, спортом	CD3+-лимф., отн.	Выше	-2,95	-0,04	0,10	5,27	0,027
Химические факторы	Содержание в крови бензола	IgG	Ниже	-1,36	209,22	0,10	9,12	0,004
		IL-8	Выше	-1,79	144,20	0,87	311,78	< 0,001
		CD3+CD8+-лимф., отн	Выше	-4,01	702,28	0,66	631,46	< 0,001
	Содержание в крови толуола	IgG	Ниже	-2,85	621,93	0,32	35,66	< 0,001
		IL-8	Выше	-4,90	1626,11	0,71	61,30	< 0,001
		CD3+-лимф., отн.	Выше	-3,05	77,81	0,79	497,88	< 0,001
		CD3+CD8+-лимф., отн.	Выше	-3,52	377,31	0,69	527,79	< 0,001
		CD16+56+-лимф.,отн.	Ниже	-2,57	81,44	0,10	11,83	0,002
	Содержание в крови марганца	CD3+CD25+-лимф., отн.	Выше	-2,92	82,72	0,10	8,74	0,005
		CD3+-лимф., отн.	Выше	-5,20	120,36	0,43	173,60	< 0,001
		CD3+CD8+-лимф., отн.	Выше	-4,4	53,47	0,13	47,45	< 0,001
		CD16+56+-лимф.,отн.	Ниже	-3,11	52,43	0,15	62,50	< 0,001
	Содержание в крови никеля	CD3+CD25+-лимф., отн.	Выше	-2,88	282,79	0,79	342,37	< 0,001
		CD3+-лимф., отн.	Выше	-4,81	247,03	0,14	18,50	< 0,001
		CD3+CD8+-лимф., отн.	Выше	-3,67	118,84	0,21	84,35	< 0,001
		CD16+56+-лимф.,отн.	Ниже	-2,98	71,99	0,11	49,18	< 0,001
	Содержание в крови хрома	CD3+-лимф.,отн.	Выше	-5,01	174,01	0,87	719,84	< 0,001
		CD16+56+-лимф.,отн.	Ниже	-3,15	129,54	0,24	129,01	< 0,001
	Содержание в крови формальдегида	CD3+CD8+-лимф., отн.	Выше	-4,02	20,48	0,62	646,93	< 0,001
		CD16+56+-лимф.,отн.	Ниже	-2,66	4,93	0,10	35,49	< 0,001

жания химических веществ в крови находится относительное содержание CD3+CD8+- (R^2 = 0,13–0,69), CD3+CD25+-лимфоцитов (R^2 = 0,10–0,79) и уровень IL-8 (R^2 = 0,71–0,87).

Для выявления дополнительных связей между вероятностью негативных лабораторных эффектов со стороны иммунной системы и комплексом рассматриваемых факторов был выполнен следующий этап нейросетевого моделирования (табл. 5, 6).

Данные таблиц свидетельствуют, что на изменение показателей клеточного адаптивного иммунитета и функциональной активности иммунокомпетентных клеток чаще оказывают максимальное влияние факторы образовательного процесса и образа жизни, при изменении которых вероятность отклонения от нормативных значений содержания Т-лимфоцитов и цитокинов увеличивается до 12,2–15,0 и 1,7–3,6 % соответственно. Проведенная количественная оценка дополнительной вероятности изменения гуморального адаптивного иммунитета показала, что изучаемые аспекты образа жизни и химические факторы чаще всего оказывают максимальное влияние на уровень IgG, увеличивая вероятность его снижения до 5,61 и 4,3 % соответственно. Для увеличения вероятности отклонения от нормативных значений показателей врожденного иммунитета в большей степени значимыми являются факторы образа жизни и питания, при изменении которых на 1 % вероятность снижения показателей фагоцитарной системы увеличивается до 3,63 и 1,9 % соответственно.

Итогом последовательного регрессионного логистического моделирования является перечень лабораторных иммунологических показателей риск-ассоциированных АЗ и нарушений поствакцинального иммунитета, для которых доказана последовательная связь: фактор → изменение лабораторного (иммунологического) показателя → развитие аллергического заболевания / нарушения поствакцинального иммунитета (табл. 7).

Таблица 5

Результаты нейросетевого моделирования влияния приоритетных факторов риска на показатели иммунитета (клеточные и гуморальные компоненты адаптивной иммунной системы), %

Фактор риска		CD3+-лимф., отн. (layers 10; 4, R^2 = 0,144)	CD3+CD8+-лимф., отн. (layers 5; 2, R^2 = 0,195)	CD19+-лимф., отн. (layers 18; 8, R^2 = 0,124)	CD3+CD25+-лимф., отн. (layers 14; 4, R^2 = 0,587)	CD16+56+-лимф., отн. (layers 15; 2, R^2 = 0,155)	CD3+CD95+-лимф., абс. (layers 11; 11, R^2 = 0,342)	CD3+CD95+-лимф., отн. (layers 10; 5, R^2 = 0,663)	IgG (layers 12; 10, R^2 = 0,146)
1		2	3	4	5	6	7	8	9
Образовательный процесс	Недельная учебная нагрузка	0,14		0,33		0,54			
	Продолжительность малых перемен	0,29			0,76	0,07			1,71
	Продолжительность больших перемен		12,16	0,04	2,03				
	Продолжительность использования ИД на уроке	0,08	0,16	0,05		0,08	0,03		
	Суммарная продолжительность использования ИД в школе	0,08			0,38	0,15			
	Продолжительность использования ПК на уроке	0,02	1,28	0,03	0,06		0,03	0,01	0,81
	Суммарная продолжительность использования ПК в школе	0,04	0,51		0,06		0,03	0,02	1,9
Образ жизни	Посещение учреждений ДО		0,71			0,23	0,13		2,53
	Продолжительность ночного сна			0,21		0,59	0,72		5,61
	Ежемесячный доход на одного члена семьи		1,7	0,18	0,18	0,08		0,13	1,08
	Суммарное среднесуточное время взаимодействия с девайсами			0,18	0,05		0,12	0,04	2,43
	Периодичность занятий физкультурой, спортом			0,17				0,05	
	Продолжительность занятий физкультурой, спортом			0,1					1,72
Питание	Содержание молока в среднесуточном наборе	0,15		0,02	0,17			0,05	
	Содержание яиц в среднесуточном наборе	0,04					0,05		
	Содержание овощей свежих в среднесуточном наборе	0,02	5,5			0,04	0,05	0,03	
	Содержание фруктов свежих в среднесуточном наборе			0,1			0,06		
	Содержание мяса в среднесуточном наборе	0,02	1,1		0,07				0,63
	Содержание кисломолочных продуктов в среднесуточном наборе	0,09	5,53	0,11	0,11	0,07			
	Содержание кондитерских изделий в среднесуточном наборе	0,10	0,64		0,11				0,23
	Содержание рыбы в среднесуточном наборе	0,06			0,04		0,03	0,02	
	Содержание хлеба пшеничного в среднесуточном наборе	0,06				0,08	0,06		
	Содержание круп, бобовых в среднесуточном наборе	0,03	5,81		0,11			0,01	0,48
	Содержание макаронных изделий в среднесуточном наборе		0,86	0,03				0,04	
	Содержание белков в суточном рационе	0,09		0,15	0,04			0,03	
	Содержание Ккал в суточном рационе	0,03	0,15			0,06	0,06		
	Содержание витамина B_1 в суточном рационе				0,14	0,01		0,07	0,38
	Содержание витамина B_2 в суточном рационе	0,10		0,02	0,01		0,05		0,59
	Содержание витамина А в суточном рационе			0,05		0,08			
	Содержание железа в суточном рационе	0,02	4,47	0,02			0,05	0,01	
	Содержание магния в суточном рационе	0,01		0,1	0,16	0,02			1,47
Химические факторы	Содержание марганца в атмосферном воздухе	0,24	6,85	0,06	0,13		0,08		1,54
	Содержание хрома в атмосферном воздухе	0,07			0,1			0,01	
	Содержание никеля в атмосферном воздухе	0,05		0,01		0,06			
	Содержание формальдегида в атмосферном воздухе	0,12			0,56			0,11	4,3

Окончание табл. 5

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Содержание бензола в атмосферном воздухе	0,02			0,25	0,09	0,03	0,11	0,38
	Содержание толуола в атмосферном воздухе	0,05	0,54		0,28	0,06	0,11	0,05	
	Содержание марганца в воздухе учебных помещений		3,15		0,29			0,24	2,65
	Содержание никеля в воздухе учебных помещений	0,09				0,04	0,01	0,01	0,27
	Содержание хрома в воздухе учебных помещений		1,28	0,03		0,03	0,1		
	Содержание формальдегида в воздухе учебных помещений	0,21		0,21	0,26			0,02	
	Содержание бензола в воздухе учебных помещений	0,01			0,14	0,15		0,11	
	Содержание толуола в воздухе учебных помещений	0,03					0,06	0,02	

Таблица 6

Результаты нейросетевого моделирования влияния приоритетных факторов риска на показатели иммунитета (фагоцитарная система и цитокины), %

	Фактор риска	Абсолютный фагоцитоз (layers 10; 4, $R^2 = 0{,}144$)	Процент фагоцитоза (layers 18; 5, $R^2 = 0{,}313$)	Фагоцитарный индекс (layers 13; 13, $R^2 = 0{,}108$)	Фагоцитарное число (layers 5; 3, $R^2 = 0{,}105$)	IL-4 (layers 6; 5, $R^2 = 0{,}485$)	IL-6 (layers 12; 12, $R^2 = 0{,}137$)	IL-10 (layers 12; 9, $R^2 = 0{,}112$)	ИЛ-17 (layers 16; 11, $R^2 = 0{,}374$)	ИЛ-1ß (layers 12; 2, $R^2 = 0{,}306$)	ИНФγ (layers 8; 8, $R^2 = 0{,}202$)	ФНО (layers 8; 3, $R^2 = 0{,}185$)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Образовательный процесс	Недельная учебная нагрузка	0,1		0,08			1,36	0,36	0,67			
	Продолжительность малых перемен			0,28		1,48		0,67		0,33		
	Продолжительность больших перемен	0,56		0,83			0,3		1,42	0,64	0,01	14,96
	Продолжительность использования ИД на уроке	0,01		0,05	0,01	0,2				0,13		2,46
	Суммарная продолжительность использования ИД в школе			0,08		0,05	0,12	0,17	0,92			
	Продолжительность использования ПК на уроке	0,13	0,03		0,02		0,02			0,11	0,02	0,77
	Суммарная продолжительность использования ПК в школе	0,03			0,01			0,22		0,1		0,14
Образ жизни	Посещение учреждений ДО		0,07	0,39		0,16		0,62				
	Продолжительность ночного сна	0,28	0,53		0,14	3,63				0,56	0,75	
	Ежемесячный доход на одного члена семьи		0,14				0,75	0,92	0,34			
	Суммарное среднесуточное время взаимодействия с девайсами		0,01		0,02				0,06			
	Периодичность занятий физкультурой, спортом	0,29		1,09	0,01	0,04	0,04		0,55		0,07	1,69
	Продолжительность занятий физкультурой, спортом		0,08	0,04	0,02		1,15	0,29				2,57
Питание	Содержание молока в среднесуточном наборе	0,08	0,02				0,05	0,01	0,1			
	Содержание яиц в среднесуточном наборе	0,15	0,01	0,07	0,02	0,07	0,02			0,05	0,03	1,13
	Содержание овощей свежих в среднесуточном наборе			0,49				0,09			0,09	
	Содержание фруктов свежих в среднесуточном наборе			0,04		0,05	0,04			0,03		1,78
	Содержание мяса в среднесуточном наборе							0,01			0,02	
	Содержание кисломолочных продуктов в среднесуточном наборе	0,12		0,49	0,01	0,05			0,04	0,05	0,01	0,89
	Содержание кондитерских изделий в среднесуточном наборе			1,9		0,09	0,26	0,19				

Окончание табл. 6

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Содержание рыбы в среднесуточном наборе		0,01			0,2					0,02	
	Содержание хлеба пшеничного в среднесуточном наборе		0,03	0,58					0,17		0,01	
	Содержание круп, бобовых в среднесуточном наборе	0,04			0,01	0,05	0,01	0,09	0,18		0,01	
	Содержание макаронных изделий в среднесуточном наборе	0,19	0,06	0,42			0,11		0,06		0,03	
	Содержание белков в суточном рационе	0,25				0,07				0,12	0,08	
	Содержание Ккал в суточном рационе			0,68		0,43	0,74	0,4	2,66		0,01	
	Содержание витамина B_1 в суточном рационе	0,04	0,02						2,01		0,05	0,39
	Содержание витамина B_2 в суточном рационе		0,02			0,25	0,09	0,29	2,23		0,03	
	Содержание витамина А в суточном рационе	0,5	0,05	0,03		0,03			0,85	0,01		
	Содержание железа в суточном рационе		0,01	0,19					0,15		0,05	
	Содержание магния в суточном рационе	0,01			0,01	0,03			2,01		0,05	
Химические факторы	Содержание марганца в атмосферном воздухе	0,13								0,1		1,09
	Содержание хрома в атмосферном воздухе	0,01				0,42	0,24					0,33
	Содержание никеля в атмосферном воздухе	0,15				0,21	0,19		0,01			1,88
	Содержание формальдегида в атмосферном воздухе						0,16	0,36		0,12		
	Содержание бензола в атмосферном воздухе		0,01		0,01	0,1		0,18	0,98	0,26		
	Содержание толуола в атмосферном воздухе	0,25	0,07		0,01	0,43		0,02		0,22		
	Содержание марганца в воздухе учебных помещений		0,05					0,52	2,58		0,07	
	Содержание никеля в воздухе учебных помещений			0,71	0,02					0,07		0,51
	Содержание хрома в воздухе учебных помещений		0,03	0,2		0,14	0,17	0,1				
	Содержание формальдегида в воздухе учебных помещений	0,2		0,57			1,03				0,07	1,08
	Содержание бензола в воздухе учебных помещений			0,06	0,02	0,31	0,12	0,01				1,32
	Содержание толуола в воздухе учебных помещений		0,02	0,1				0,16	0,01		0,02	

Таблица 7

Параметры регрессионных логистических моделей связи лабораторных иммунологических показателей с развитием аллергических заболеваний / нарушений поствакцинального иммунитета

Аллергическое заболевание / нарушение поствакцинального иммунитета	Иммунологический показатель	Направление	b_0	b_1	R^2	F	p
Аллергический ринит	CD3+-лимфоциты, отн.	Выше	-0,42	0,25	0,10	20,84	< 0,001
	CD3+CD25+-лимфоциты, отн.	Выше	-1,18	0,08	0,30	27,17	< 0,001
	IL-8	Выше	-2,72	0,34	0,38	19,77	< 0,001
Бронхиальная астма	CD16+56+-лимфоциты, отн.	Выше	-1,98	-0,04	0,17	61,40	< 0,001
	CD3+CD8+-лимфоциты, отн.	Выше	-4,48	0,07	0,22	73,80	< 0,001
	CD3+CD25+-лимфоциты, отн.	Выше	-4,21	0,18	0,25	20,13	< 0,001
	IgG	Выше	-1,93	-0,05	0,10	16,82	< 0,001
Атопический дерматит	CD3+-лимфоциты, отн.	Выше	-1,30	0,43	0,18	69,60	< 0,001
	CD3+CD25+-лимфоциты, отн.	Выше	-3,33	15,94	0,69	8,78	0,033
	CD16+56+-лимфоциты, отн.	Выше	-0,40	-0,02	0,16	59,26	< 0,001
IgG к коклюшу	IgG	Ниже	4,15	-0,36	0,43	14,10	0,005

Результаты нейросетевого моделирования связей лабораторных показателей нарушения иммунного гомеостаза со снижением уровня специфических антител класса G к герпетической инфекции ВПГ-1, ЦМВИ, кори, дифтерии, коклюшу и соблюдение принципа биологического правдоподобия позволили дополнить перечень показателей риск-ассоциированных нарушений поствакцинального иммунитета и установить лабораторные иммунологические показатели риск-ассоциированных нарушений постинфекционного иммунитета (табл. 8).

Обобщив полученные данные, установили перечни иммунологических показателей риск-ассоциированных АЗ и нарушений противоинфекционного иммунитета. Так, иммунологическими показателями риск-ассоциированных АЗ в условиях сочетанного воздействия факторов риска образовательного процесса, окружающей среды, питания и образа жизни являются: повышение относительного содержания CD3+-, CD3+CD25+-лимфоцитов, снижение относительного содержания CD16+56+-лимфоцитов. Вероятность развития нарушений противоинфекционного иммунитета, ассоциированных с воздействием комплекса рассматриваемых факторов, оценена по следующим иммунологическим показателям: повышение относительного содержания CD3+CD8+-, CD3+CD95+-лимфоцитов, снижение уровня IgG, абсолютного фагоцитоза, фагоцитарного индекса, IL-17, IL-1ß, ФНО.

Общими механизмами модификации у детей противоинфекционного иммунитета и аллергической реактивности, связанной с особенностями современного воспитательно-образовательного процесса и качеством среды обитания, является дисбаланс гуморального и клеточного звена с активацией клеточно-опосредованных реакций адаптивного иммунного ответа, что характеризуется увеличением относительного содержания CD3+- и CD3+CD25+-лимфоцитов (иммунологические показатели риск-ассоциированных аллергических заболеваний) и CD3+CD8+-лимфоцитов (иммунологический показатель модификации противоинфекционного иммунитета). Об ослаблении активности системы неспецифической защиты при модификации противоинфекционного иммунитета в условиях воздействия факторов окружающей среды, современного образовательного процесса, питания и образа жизни свидетельствует снижение абсолютного фагоцитоза и фагоцитарного индекса, при модификации аллергической реактивности – снижение количества натуральных киллеров, традиционно относящихся к клеточным компонентам системы врожденного иммунитета.

Результаты выполненного многофакторного логистического моделирования позволили установить, что изолированный вклад особенностей современного образовательного процесса в вероятность развития риск-ассоциированного АР составил 61,8 %, химических факторов – 30,6 %, факторов образа жизни – 7,6 %; в вероятность развития БА, ассоциированной с воздействием комплекса рассматриваемых факторов, вклад образовательного процесса – 35,7 %, химических факторов – 33,1 %, образа жизни – 31,2 %. Лидирующие позиции по вкладу в вероятность развития риск-ассоциированного АД занимают особенности образовательного процесса (74,0 %), на втором месте – факторы образа жизни (18,4 %), на третьем – химические факторы (7,6 %).

Таблица 8

Результаты нейросетевого моделирования зависимости вероятности изменения уровня специфических антител класса G к герпесвирусным и вакциноуправляемым инфекциям от иммунологических показателей, %

Иммунологический показатель	IgG к ВПГ (layers 15; 11, $R^2 = 0{,}323$)	IgG к ЦМВ (layers 11; 5, $R^2 = 0{,}143$)	IgG к кори (layers 15; 10, $R^2 = 0{,}323$)	IgG к дифтерии (layers 5; 2, $R^2 = 0{,}514$)	IgG к коклюшу (layers 5; 2, $R^2 = 0{,}508$)
CD3+CD8+-лимфоциты, отн.	1,79	4,89	37,78	0,24	7,05
CD19+-лимфоциты, отн.			1,41	4,55	25,52
CD3+CD95+-лимфоциты, абс.				1,40	277,78
CD3+CD95+-лимфоциты, отн.	3,58	34,72		2,70	
IgG	15,84		7,15	2,58	
Абсолютный фагоцитоз	3,94			0,98	16,92
Процент фагоцитоза				2,49	
Фагоцитарный индекс	20,54			0,03	4,41
Фагоцитарное число		2,23			28,17
IL-4		17,26	0,81		
IL-6		16,01			
IL-10			45,89		
IL-17	1,56	36,43		0,05	43,13
IL-1ß	1,11	8,54	2,10	30,94	
ИНФ-γ		0,93			13,55
ФНО	2,28		37,33		23,31

В результате проведения количественной оценки вероятности снижения IgG-антител к герпетической инфекции ВПГ-1 на основе нейросетевого моделирования было установлено, что образ жизни и питание, вклад, которых составил 28,9; 26,2 % соответственно, оказывают максимальное влияние на состояние гуморального иммунитета к герпетической инфекции, вклад качества атмосферного воздуха и особенностей образовательного процесса – 13,7 и 13,5 % соответственно. Среди факторов образа жизни максимальным вкладом обладает недостаточная продолжительность ночного сна (10,0 %), среди факторов питания – высокое содержание кондитерских изделий в среднесуточном продуктовом наборе (вклад 4,8 %) и низкое содержание магния в суточном рационе (вклад 2,9 %), среди химических факторов окружающей среды – повышенное содержание формальдегида в атмосферном воздухе (вклад 7,5 %). Наибольшие вклады в снижение IgG-антител к ЦМВИ вносят факторы питания (44,0 %), современного образовательного процесса (17,9 %), химические факторы (12,5 % – качество воздуха учебных помещений) и образа жизни (12,3 %). Низкая энергетическая ценность суточного рациона и недостаточное содержание круп, бобовых в среднесуточном рационе выделяются на фоне других нарушений в структуре и качестве питания наибольшим вкладом (9,1 и 2,9 % соответственно) в нарушение гуморального ответа на ЦМВИ. В группе факторов образовательного процесса по значимости вклада лидировало снижение продолжительности больших перемен (вклад 9,5 %), качества воздуха учебных помещений – повышенное содержание марганца (вклад 9,2 %), образа жизни – недостаточная продолжительность ночного сна (вклад 5,3 %).

Лидирующие позиции по вкладу в снижение содержания специфических антител класса G к кори занимают факторы образовательного процесса (вклад 30,8 %), в том числе снижение продолжительности больших перемен (вклад 26,7 %); питания (вклад 30,3 %), в том числе недостаточное содержание кисломолочных продуктов в среднесуточном наборе пищевых продуктов (вклад 6,4 %) и железа в суточном рационе (вклад 4,4 %). Вклад качества атмосферного воздуха составляет 12,4 %, в том числе повышенное содержание марганца (вклад 8,1 %), образа жизни – 11,4 %, в том числе снижение продолжительности занятий физкультурой, спортом (3,2 %). Максимальным вкладом в изменение содержания специфических антител к токсину дифтерии обладают группы факторов образа жизни (вклад 29,4 %), образовательного процесса (вклад 20,5 %), окружающей среды (вклад 19,9 %). Среди факторов образа жизни по значимости лидирует недостаточная продолжительность ночного сна (вклад 16,7 %), среди факторов образовательного процесса – снижение продолжительности больших перемен (вклад 11,2 %), среди факторов окружающей среды – повышенное содержание формальдегида в атмосферном воздухе (вклад 7,2 %). Питание оказывает максимальное влияние на снижение содержания IgG-антител к коклюшу, его вклад достигает 34,0 %. На фоне нарушений структуры питания выделяется недостаточное потребление кисломолочных продуктов (вклад 2,6 %) и низкая калорийность суточного рациона (вклад 5,1 %). На втором месте по вкладу в снижение гуморального иммунитета к коклюшу находятся факторы образовательного процесса (вклад 21,9 %), в том числе недостаточная продолжительность больших перемен (вклад 19,1 %), на третьем – факторы образа жизни (вклад 18,4 %), в том числе недостаточная продолжительность ночного сна (вклад 8,5 %).

Выводы. Таким образом, в общеобразовательных организациях с углубленным содержанием обучения выполнение объема инновационной образовательной деятельности часто достигается за счет перегрузки учащихся вследствие нарушения гигиенических принципов организации учебного процесса. Высокая «физиологическая стоимость» обучения, обусловленная повышенной нагрузкой, длительным нахождением в школе, увеличением затрат времени на подготовку домашних заданий, широкой вовлеченностью в систему дополнительного образования, вносит существенный вклад в изменение образа жизни, характера питания школьников.

В условиях отсутствия обеспечения двух фаз отдыха (снижение продолжительности перемен в 1,3–2 раза), несоответствия учебной нагрузки возрастным возможностям (превышение максимальной допустимой недельной нагрузки на 5,5–19,2 %), перегрузки центральной нервной системы, приводящей к общему утомлению (превышение нормативов продолжительности работы с ЭСО в 1,2–2,2 раза), нарушения оптимальных условий обучения (превышения относительно $RfC_{хр}$ в атмосферном воздухе территорий расположения и воздухе учебных помещений среднего содержания марганца и формальдегида в 1,8–8,5 раза, в единичных пробах – содержания никеля и хрома до 3,6 раза; присутствия бензола и толуола в концентрациях, не превышающих $RfC_{хр}$), нерационального питания, нарушения режима сна, снижения физической и повышения цифровой активности у учащихся увеличивается за период обучения в школе риск развития АЗ в 1,3 раза, недостаточной выработки IgG к герпесвирусам, свидетельствующей об угрозе активации, – в 2,3 раза, повышения доли серонегативных лиц к антигенам кори и дифтерии – в 3,1–5,4 раза (OR = 1,33–5,40; DI = 1,02–11,14).

Установлены патогенетические закономерности модификации и перечень лабораторных иммунологических показателей риск-ассоциированных АЗ и нарушений противоинфекционного иммунитета. Для детей с АЗ в условиях воздействия рассматриваемых факторов свойственна более выраженная активация клеточного адаптивного иммун-

ного ответа (↑CD3+-, CD3+CD25+-лимфоцитов, отн.) и снижение естественной цитотоксической активности (↓CD16+56+-лимфоцитов, отн.). Иммунный статус школьников с риск-ассоциированными нарушениями противоинфекционного иммунитета отличается преобладанием цитотоксического эффекторного механизма иммунного ответа (↑CD3+CD8+-лимфоцитов, отн.), усилением механизмов программируемой гибели клеток (↑CD3+ CD95+-лимфоцитов, отн.), снижением реактивности гуморального звена иммунитета (↓IgG), ослаблением активности системы неспецифической защиты (↓абсолютный фагоцитоз, ФЧ, ФИ, процент фагоцитоза), дисрегуляцией межклеточной кооперации (↓IL-17, IL-1ß, ФНО). Общими иммунологическими механизмами модификации противоинфекционного иммунитета и аллергической реактивности, связанной с воздействием факторов среды обитания и образовательного процесса, являются активация клеточно-опосредованных реакций адаптивного иммунного ответа (↑CD3+-, CD3+CD25+-лимфоцитов, отн. и ↑CD3+CD8+-лимфоцитов, отн.) и снижение фагоцитарной активности (↓абсолютный фагоцитоз, ФИ и ↓CD16+56+-лимфоцитов, отн.).

Максимальный изолированный вклад в вероятность развития риск-ассоциированных АЗ составляют особенности современного образовательного процесса – 35,7–74,0 %, изолированные вклады химических факторов и образа жизни сопоставимы – 7,6–33,1 и 7,6–31,2 % соответственно.

Ранжирование факторов риска, определяющих вероятность снижения гуморального постинфекционного и поствакцинального иммунитета, показало, что максимальный вклад в снижение IgG-антител к герпесвирусным инфекциям вносит группа факторов питания (26,2–44,0 %), на втором месте – факторы образа жизни (12,3–28,9 %), на третьем – факторы образовательного процесса (13,5–17,9 %), на четвертом – химические факторы (9,2–13,7 %). Роли факторов в снижении IgG-антител к вакциноуправляемым инфекциям распределились следующим образом – образовательный процесс (20,5–30,8 %) и питание (14,6–34,0 %), образ жизни (11,4–29,4 %), химические факторы (6,5–19,9 %).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы статьи сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Характеристика физического здоровья учащихся современных общеобразовательных организаций / Е.С. Богомолова, М.В. Шапошникова, Н.В. Котова, Т.В. Бадеева, Е.О. Максименко, А.С. Киселева, С.Н. Ковальчук, М.В. Ашина, Е.О. Олюшина // Гигиена и санитария. – 2019. – Т. 98, № 9. – С. 956–961. DOI: 10.47470/0016-9900-2019-98-9-956-961

2. Здоровье детей и подростков в школьном онтогенезе как основа совершенствования системы медицинского обеспечения и санитарно-эпидемиологического благополучия обучающихся / В.Р. Кучма, И.К. Рапопорт, Л.М. Сухарева, Н.А. Скоблина, А.С. Седова, В.В. Чубаровский, С.Б. Соколова // Здравоохранение Российской Федерации. – 2021. – Т. 65, № 4. – С. 325–333. DOI: 10.47470/0044-197X-2021-65-4-325-333

3. Зайцева, Н.В., Долгих О.В., Дианова Д.Г. Влияние контаминации формальдегидом на показатели иммунной системы у детей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 5 (2). – С. 702–704.

4. Старкова К.Г., Долгих О.В., Казакова О.А. Особенности иммунного статуса школьников средней и старшей ступеней обучения в условиях повышенного содержания в крови ряда экзогенных химических веществ // Гигиена и санитария. – 2021. – Т. 100, № 5. – С. 501–506. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-5-501-506

5. Басова А.В., Комкова Г.Н. Механизмы обязательной вакцинации: проблемы и способы решения // Здравоохранение Российской Федерации. – 2023. – Т. 67, № 4. – С. 320–328. DOI: 10.47470/0044-197X-2023-67-4-320-328

6. Su S.-B., Chang H.-L., Chen K.-T. Current status of mumps virus infection: Epidemiology, pathogenesis, and vaccine // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2020. – Vol. 17, № 5. – P. 1686. DOI: 10.3390/ijerph17051686

7. Zhang Y., Lan F., Zhang L. Advances and highlights in allergic rhinitis // Allergy. – 2021. – Vol. 76, № 11. – P. 3383–3389. DOI: 10.1111/all.15044

8. Epidemiology of Allergic Rhinitis in Children: A Systematic Review and Meta-Analysis / A. Licari, P. Magri, A. De Silvestri, A. Giannetti, C. Indolfi, F. Mori, G.L. Marseglia, D. Peroni // J. Allergy Clin. Immunol. Pract. – 2023. – Vol. 11, № 8. – P. 2547–2556. DOI: 10.1016/j.jaip.2023.05.016

9. Соловьева И.Л. Оценка эффективности паротитно-коревой вакцины и ее влияния на показатели клеточного иммунитета у детей с аллергическими заболеваниями // Эпидемиология и вакцинопрофилактика. – 2005. – № 3 (22). – С. 11–14.

10. Жестков А.В., Побежимова О.О., Сидорова О.С. Особенности вакцинопрофилактики детей с аллергическими заболеваниями // Аллергология и Иммунология в Педиатрии. – 2020. – № 4 (63). – С. 4–11. DOI: 10.24411/2500-1175-2020-10012

11. Papadopoulos N.G., Miligkos M., Xepapadaki P. A Current Perspective of Allergic Asthma: From Mechanisms to Management // Handb. Exp. Pharmacol. – 2022. – Vol. 268. – P. 69–93. DOI: 10.1007/164_2021_483

12. Evaluation of Allergic Diseases, Symptom Control, and Relation to Infections in a Group of Italian Elite Mountain Bikers / F. Perrotta, V. Simeon, M. Bonini, L. Ferritto, L. Arenare, E. Nigro, A. Nicolai, A. Daniele, C. Calabrese // Clin. J. Sport Med. – 2020. – Vol. 30, № 5. – P. 465–469. DOI: 10.1097/JSM.0000000000000678

13. Максимова А.В., Смолкин Ю.С. Герпетические инфекции и аллергические заболевания у детей // Педиатрия. Consilium Medicum. – 2020. – № 4. – С. 44–51. DOI: 10.26442/26586630.2020.4.200542

14. Герпетическая инфекция и аллергия как глобальная проблема современной медицины / Н.С. Татаурщикова, О.И. Летяева, А.В. Максимова, Е.А. Левкова // Эффективная фармакотерапия. – 2023. – Т. 19, № 28. – С. 24–29. DOI: 10.33978/2307-3586-2023-19-28-24-29

15. Мокроносова М.А., Мац А.Н. Инфекция и аллергия: две стороны одной медали // Астма и аллергия. – 2015. – № 4. – С. 9–12.

16. Kharrazian D. Exposure to Environmental Toxins and Autoimmune Conditions // Integr. Med. (Encinitas). – 2024. – Vol. 23, № 1. – P. 22–26.

17. Airborne chemical pollution and children's asthma incidence rate in Minsk / N. Dziarzhynskaya, A. Hindziuk, L. Hindziuk, I. Sysoeva, D. Krupskaya, U. Urban, N. Cherniavskaya, A. Vishnevskaya [et al.] // J. Prev. Med. Hyg. – 2022. – Vol. 62, № 4. – P. E871–E878. DOI: 10.15167/2421-4248/jpmh2021.62.4.1568

18. Кинаш М.И., Боярчук О.Р. Жирорастворимые витамины и иммунодефицитные состояния: механизмы влияния и возможности использования // Вопросы питания. – 2020. – Т. 89, № 3. – С. 22–32. DOI: 10.24411/0042-8833-2020-10026

19. Александрова И.Э. Гигиеническая оптимизация учебного процесса в школе в условиях использования электронных средств обучения // Анализ риска здоровью. – 2020. – № 2. – С. 47–54. DOI: 10.21668/health.risk/2020.2.05

20. Environmental Exposures Impact Pediatric Asthma Within the School Environment / C.L. Mortelliti, T.M. Banzon, C.Z. Vieira, W. Phipatanakul // Immunol. Allergy Clin. North Am. – 2022. – Vol. 42, № 4. – P. 743–760. DOI: 10.1016/j.iac.2022.05.005

21. Особенности развития аллергического ринита у школьников в условиях сочетанного воздействия факторов риска / С.Л. Валина, О.Ю. Устинова, И.Е. Штина, О.А. Маклакова, Л.В. Ошева // Гигиена и санитария. – 2023. – Т. 102, № 10. – С. 1087–1095. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-10-1087-1095

22. Особенности поствакцинального иммунитета к инфекциям, управляемым средствами специфической профилактики, у школьников / С.Л. Валина, О.Ю. Устинова, Н.В. Зайцева, И.Е. Штина, О.А. Маклакова, В.Г. Макарова // Гигиена и санитария. – 2024. – Т. 103, № 11. – С. 1334–1343. DOI: 10.47470/0016-9900-2024-103-11-1334-1343

23. Рязанова С.В., Комков А.А., Мазаев В.П. Российский и мировой опыт применения новых технологий искусственного интеллекта в реальной медицинской практике // Научное обозрение. Медицинские науки. – 2021. – № 6. – С. 32–40. DOI: 10.17513/srms.1215

24. Bhadani R., Chen Z., An L. Attention-Based Graph Neural Network for Label Propagation in Single-Cell Omics // Genes (Basel). – 2023. – Vol. 14, № 2. – P. 506. DOI: 10.3390/genes14020506

Общие иммунологические механизмы модификации у детей противоинфекционного иммунитета и аллергической реактивности, ассоциированные с особенностями современного образовательного процесса и качеством среды обитания / Н.В. Зайцева, С.Л. Валина, О.Ю. Устинова, И.Е. Штина, О.А. Маклакова // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 2. – С. 126–144. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.11

UDC 613.955
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.11.eng

Read online

Research article

COMMON IMMUNOLOGICAL PATHWAYS OF ANTI-INFECTION IMMUNITY AND ALLERGIC REACTIVITY MODIFICATION IN CHILDREN ASSOCIATED WITH PECULIARITIES OF THE MODERN EDUCATIONAL PROCESS AND ENVIRONMENT QUALITY

N.V. Zaitseva, S.L. Valina, O.Yu. Ustinova, I.E. Shtina, O.A. Maklakova

Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, 82 Monastyrskaya St., Perm, 614045, Russian Federation

This study is relevant due to humoral and cellular pathways of the immune response having much in common as well as its high sensitivity to factors of the modern educational process in school when building up anti-infection and anti-allergy protection. Our research objects were secondary schools with profound studies of some subjects (Type 1 schools) and ordinary secondary schools (Type 2 schools); overall, we examined 842 schoolchildren from Type 1 schools and 540 schoolchildren from Type 2 schools.

The aim of this study was to establish conditions and common pathogenetic sections of immunological pathways of anti-infection immunity and allergic reactivity modification associated with environmental exposures and exposure to factors of the modern educational process.

We analyzed how educational activities were organized in the analyzed schools; what food products were consumed by the participating schoolchildren daily and their chemical structure; basic aspects of schoolchildren's lifestyles; quality of indoor air in classrooms; quality of ambient air in areas where the analyzed schools were located; prevalence of allergic diseases (ADs) and anti-infection immunity disorders; results of immunological tests and chemical blood tests; intensity of humoral anti-infection and post-vaccination immunity. The study involved odds ratio calculation, linear regression analysis, and neural network modeling.

As a result, we established that high educational loads, improper duration of breaks and periods of work with electronic teaching aids (ETAs), insufficient sleeping time, too low physical activity and too high digital activity among schoolchildren, manganese, nickel, chromium and formaldehyde in air inside classrooms in levels up to 1.8–8.5 higher than RfCchr, and unhealthy diets created 1.3 times higher risks of ADs, 2.3 times higher risks of insufficient production of IgG to herpesviruses, 3.1–5.4 times higher risks of an increasing proportion of people seronegative to measles and diphtheria antigens (OR = 1.33–5.40). Activation of cellular-mediated reaction of adaptive immunity response (an increase in levels of CD3+-, CD3+CD25+-, CD3+CD8+- lymphocytes) and declining activity of the non-specific resistance system (a decline in absolute phagocytosis, phagocytic number, and levels of CD16+56+- lymphocytes) were common pathogenetic sections of immunological pathways of anti-infection immunity and allergic reactivity modification upon exposure to a set of priority factors. Isolated contributions made by various factors to likelihood of risk-associated ADs amounted to 35.7–74.0 % for peculiarities of the modern educational process; chemical factors, 7.6–33.1 %; lifestyle, 7.6–31.2 %. Contributions to humoral post-infection and post-vaccination immunity disorders amounted to 14.6–44.0 % for diet-related factors; educational process, 13.5–30.8 %; lifestyle, 11.4–29.4 %; chemical factors, 6.5–19.9 %.

Keywords: *schoolchildren, post-infection and post-vaccination immunity, allergic diseases, immunological pathways of modification, neural network modeling, factor contribution.*

References

1. Bogomolova E.S., Shaposhnikova M.V., Kotova N.V., Badeeva T.V., Maksimenko E.O., Kiseleva A.S., Kovalchuk S.N., Ashina M.V., Olyushina E.O. Characteristics of physical health of students of modern educational institutions. *Gigiena i sanitariya*, 2019, vol. 98, no. 9, pp. 956–961. DOI: 10.47470/0016-9900-2019-98-9-956-961 (in Russian).

2. Kuchma V.R., Rapoport I.K., Sukhareva L.M., Skoblina N.A., Sedova A.S., Chubarovsky V.V., Sokolova S.B. The health of children and adolescents in school ontogenesis as a basis for improving the system of school health care and sanitary-epidemiological wellbeing of students. *Zdravookhranenie Rossiiskoi Federatsii*, 2021, vol. 65, no. 4, pp. 325–333. DOI: 10.47470/0044-197X-2021-65-4-325-333 (in Russian).

3. Zaitseva N.V., Dolgikh O.V., Dianova D.G. Formaldehyde contamination influence on immune system in children. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2014, vol. 16, no. 5 (2), pp. 702–704 (in Russian).

4. Starkova K.G., Dolgikh O.V., Kazakova O.A. Features of the immune status of middle and high school students in conditions of high blood content of a number of exogenous chemical impurities. *Gigiena i sanitariya*, 2021, vol. 100, no. 5, pp. 501–506. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-5-501-506 (in Russian).

5. Basova A.V., Komkova G.N. Mechanisms of mandatory vaccination: problems and solutions. *Zdravookhranenie Rossiiskoi Federatsii*, 2023, vol. 67, no. 4, pp. 320–328. DOI: 10.47470/0044-197X-2023-67-4-320-328 (in Russian).

6. Su S.-B., Chang H.-L., Chen K.-T. Current status of mumps virus infection: Epidemiology, pathogenesis, and vaccine. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2020, vol. 17, no. 5, pp. 1686. DOI: 10.3390/ijerph17051686

7. Zhang Y., Lan F., Zhang L. Advances and highlights in allergic rhinitis. *Allergy*, 2021, vol. 76, no. 11, pp. 3383–3389. DOI: 10.1111/all.15044

8. Licari A., Magri P., De Silvestri A., Giannetti A., Indolfi C., Mori F., Marseglia G.L., Peroni D. Epidemiology of Allergic Rhinitis in Children: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J. Allergy Clin. Immunol. Pract.*, 2023, vol. 11, no. 8, pp. 2547–2556. DOI: 10.1016/j.jaip.2023.05.016

9. Solov'eva I.L. Otsenka effektivnosti parotitno-korevoi vaktsiny i ee vliyaniya na pokazateli kletochnogo immuniteta u detei s allergicheskimi zabolevaniyami [Evaluation of effectiveness of mumps-measles vaccine and its impact on cellular immunity indices in children with allergic diseases]. *Epidemiologiya i vaktsinoprofilaktika*, 2005, no. 3 (22), pp. 11–14 (in Russian).

© Zaitseva N.V., Valina S.L., Ustinova O.Yu., Shtina I.E., Maklakova O.A., 2025

Nina V. Zaitseva – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Scientific Director (e-mail: znv@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-25-34; ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2356-1145).

Svetlana L. Valina – Candidate of Medical Sciences, Head of the Department for Children and Teenagers Hygiene (email: valina@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-27-92; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1719-1598).

Olga Yu. Ustinova – Doctor of Medical Sciences, Deputy Director responsible for Clinical Work (e-mail: ustinova@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 236-32-64; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9916-5491).

Irina E. Shtina – Candidate of Medical Sciences, Head of the Laboratory for Complex Issues of Children's Health with a Clinical Group (e-mail: shtina_irina@mail.ru; tel.: +7 (342) 237-27-92; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5017-8232).

Olga A. Maklakova – Doctor of Medical Sciences, Head of the Consulting and Polyclinic Department (e-mail: olga_mcl@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 236-80-98; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9574-9353).

10. Zhestkov A.V., Pobezhimova O.O., Sidorova O.S. Features of vaccination for children with allergic diseases. *Allergologiya i Immunologiya v Pediatrii*, 2020, no. 4 (63), pp. 4–11. DOI: 10.24411/2500-1175-2020-10012 (in Russian).

11. Papadopoulos N.G., Miligkos M., Xepapadaki P. A Current Perspective of Allergic Asthma: From Mechanisms to Management. *Handb. Exp. Pharmacol.*, 2022, vol. 268, pp. 69–93. DOI: 10.1007/164_2021_483

12. Perrotta F., Simeon V., Bonini M., Ferritto L., Arenare L., Nigro E., Nicolai A., Daniele A., Calabrese C. Evaluation of Allergic Diseases, Symptom Control, and Relation to Infections in a Group of Italian Elite Mountain Bikers. *Clin. J. Sport Med.*, 2020, vol. 30, no. 5, pp. 465–469. DOI: 10.1097/JSM.0000000000000678

13. Maximova A.V., Smolkin Yu.S. Herpes infections and allergic diseases in children. Child with transplanted kidney – difficult patient: peculiarities of medical observation, interaction with family. *Pediatriya. Consilium Medicum*, 2020, no. 4, pp. 44–51. DOI: 10.26442/26586630.2020.4.200542 (in Russian).

14. Tataurshchikova N.S., Letyayeva O.I., Maksimova A.V., Levkova E.A. Herpes infection and allergy as a global problem of modern medicine. *Effektivnaya farmakoterapiya*, 2023, vol. 19, no. 28, pp. 24–29. DOI: 10.33978/2307-3586-2023-19-28-24-29 (in Russian).

15. Mokronosova M.A., Mats A.N. Infektsiya i allergiya: dve storony odnoi medali [Infection and allergy: two sides of the same coin]. *Astma i allergiya*, 2015, no. 4, pp. 9–12 (in Russian).

16. Kharrazian D. Exposure to Environmental Toxins and Autoimmune Conditions. *Integr. Med. (Encinitas)*, 2024, vol. 23, no. 1, pp. 22–26.

17. Dziarzhynskaya N., Hindziuk A., Hindziuk L., Sysoeva I., Krupskaya D., Urban U., Cherniavskaya N., Vishnevskaya A. [et al.]. Airborne chemical pollution and children's asthma incidence rate in Minsk. *J. Prev. Med. Hyg.*, 2022, vol. 62, no. 4, pp. E871–E878. DOI: 10.15167/2421-4248/jpmh2021.62.4.1568

18. Kinash M.I., Boyarchuk O.R. Fat-soluble vitamins and immunodeficiency states: mechanisms of influence and opportunities for use. *Voprosy pitaniya*, 2020, vol. 89, no. 3, pp. 22–32. DOI: 10.24411/0042-8833-2020-10026 (in Russian).

19. Aleksandrova I.E. Hygienic optimization of educational process at school involving massive use of electronic learning devices. *Health Risk Analysis*, 2020, no. 2, pp. 47–54. DOI: 10.21668/health.risk/2020.2.05

20. Mortelliti C.L., Banzon T.M., Vieira C.Z., Phipatanakul W. Environmental Exposures Impact Pediatric Asthma Within the School Environment. *Immunol. Allergy Clin. North Am.*, 2022, vol. 42, no. 4, pp. 743–760. DOI: 10.1016/j.iac.2022.05.005

21. Valina S.L., Ustinova O.Yu., Shtina I.E., Maklakova O.A., Osheva L.V. Allergic rhinitis in schoolchildren under combined exposure to various environmental risk factors. *Gigiena i sanitariya*, 2023, vol. 102, no. 10, pp. 1087–1095. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-10-1087-1095 (in Russian).

22. Valina S.L., Ustinova O.Yu., Zaitseva N.V., Shtina I.E., Maklakova O.A., Makarova V.G. Peculiarities of post-vaccination immunity to infections manageable by specific prevention means in schoolchildren. *Gigiena i sanitariya*, 2024, vol. 103, no. 11, pp. 1334–1343. DOI: 10.47470/0016-9900-2024-103-11-1334-1343 (in Russian).

23. Ryazanova S.V., Komkov A.A., Mazaev V.P. Russian and world experience in the application of new artificial intelligence technologies in real medical practice. *Nauchnoe obozrenie. Meditsinskie nauki*, 2021, no. 6, pp. 32–40. DOI: 10.17513/srms.1215 (in Russian).

24. Bhadani R., Chen Z., An L. Attention-Based Graph Neural Network for Label Propagation in Single-Cell Omics. *Genes (Basel)*, 2023, vol. 14, no. 2, pp. 506. DOI: 10.3390/genes14020506

Zaitseva N.V., Valina S.L., Ustinova O.Yu., Shtina I.E., Maklakova O.A. Common immunological pathways of anti-infection immunity and allergic reactivity modification in children associated with peculiarities of the modern educational process and environment quality. Health Risk Analysis, 2025, no. 2, pp. 126–144. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.11.eng

Получена: 19.05.2025
Одобрена: 16.06.2025
Принята к публикации: 26.06.2025

ОЦЕНКА РИСКА В ЗДРАВООХРАНЕНИИ

УДК 614.89: 614.253: [616.98-036.22: 578.834.1SARS-CoV-2
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.12

Читать онлайн

Научная статья

ОЦЕНКА ОТНОСИТЕЛЬНОГО РИСКА ДИСКОМФОРТА И ЕГО СУБЪЕКТИВНОЕ ВОСПРИЯТИЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ: РАЗЛИЧИЯ В АДАПТАЦИИ ПЕРСОНАЛА ИНФЕКЦИОННЫХ И МНОГОПРОФИЛЬНЫХ СТАЦИОНАРОВ ВО ВРЕМЯ ПАНДЕМИИ COVID-19

Е.А. Гутич, С.Л. Итпаева-Людчик, Е.А. Николаева, И.В. Мадекша

Научно-исследовательский институт гигиены, токсикологии, эпидемиологии, вирусологии и микробиологии государственного учреждения «Республиканский центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья», Республика Беларусь, 220012, г. Минск, ул. Академическая, 8

Объектом исследования выступили медицинские работники инфекционного и многопрофильного стационаров, перепрофилированных для оказания помощи пациентам с COVID-19.

Оценено субъективное восприятие дискомфорта, связанного с длительным использованием средств индивидуальной защиты (СИЗ), и выявлены различия в адаптации к таким условиям работы между медицинским персоналом инфекционных и многопрофильных стационаров в период пандемии COVID-19.

Проведено анкетирование медицинского персонала, включающее вопросы о длительности использования СИЗ в ежедневной работе (медицинские маски / респираторы, защитные очки, комбинезоны), а также о наличии симптомов, свидетельствующих о неблагоприятном воздействии длительного использования СИЗ.

Изменение условий труда в период пандемии COVID-19 привело к существенному увеличению доли медицинских работников, регулярно применяющих СИЗ, а также к значительному возрастанию времени их использования. Длительное применение СИЗ в период пандемии привело к увеличению частоты жалоб медицинского персонала, связанных с их использованием, среди сотрудников обоих учреждений. Установлено более частое предъявление жалоб, связанных с использованием СИЗ, как в штатном режиме работы, так и в период перепрофилирования, а также более существенное изменение частоты системных физиологических нарушений при ношении СИЗ органов дыхания (затрудненное дыхание, ощущение нехватки воздуха, головокружение) в период пандемии в многопрофильном стационаре, по сравнению с инфекционной больницей. Выявленные межстационарные различия, вероятно, отражают более высокий уровень адаптации сотрудников инфекционного учреждения к продолжительному применению СИЗ, обусловленный обязательным внедрением строгих протоколов инфекционной безопасности и наличием отработанных алгоритмов работы в обычных условиях повседневной работы.

Такие различия в уровне подготовленности и адаптации медицинских работников к использованию СИЗ в условиях перепрофилирования стационара свидетельствуют о необходимости более широкого внедрения дополнительных мероприятий по управлению профессиональными рисками здоровью, подчеркивают важность оптимизации дизайна СИЗ, усовершенствования системы их подбора и режимов эксплуатации, внедрения программ обучения медицинского персонала приемам рационального использования, а также регулярного скрининга медицинских работников на предмет нарушений здоровья, связанных с использованием СИЗ.

Ключевые слова: *COVID-19, пандемия, медицинские работники, профессиональные риски здоровью, субъективные жалобы, средства индивидуальной защиты (СИЗ), маски медицинские, защитные очки, защитные комбинезоны.*

© Гутич Е.А., Итпаева-Людчик С.Л., Николаева Е.А., Мадекша И.В., 2025

Гутич Екатерина Андреевна – кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией прикладной токсикологии и безопасности изделий медицинского назначения (e-mail: ekhutsich@gmail.com; тел.: +375 17 378-80-56, +375 29 694-06-18; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1910-6556).

Итпаева-Людчик Светлана Леонидовна – кандидат медицинских наук, ученый секретарь (e-mail: itpaeva.ludchik@gmail.com; тел.: +375 17 320-02-17; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4878-2246).

Николаева Екатерина Александровна – заведующий лабораторией оценки профессиональных рисков здоровью (e-mail: katya-nik@tut.by; тел.: +375 17 351-72-18; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7757-8631).

Мадекша Ирина Вадимовна – младший научный сотрудник лаборатории оценки профессиональных рисков здоровью (e-mail: ira-kyz@tut.by; тел.: +375 17 351-72-18; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6275-4746).

Биологические угрозы, принимающие масштаб эпидемии или даже пандемии, становятся серьезным вызовом для системы здравоохранения ввиду необходимости разработки немедленных и эффективных мер для защиты общественного здоровья. Необходимость перепрофилирования стационаров для оказания медицинской помощи пациентам с инфекционными заболеваниями требует реализации целого ряда административно-управленческих, инженерно-технических, организационных мероприятий и мер инфекционного контроля, а также дополнительных ресурсов в виде медицинского персонала и средств индивидуальной защиты (СИЗ). Распространение коронавируса SARS-CoV-2 в 2019 г. и последовавшая за ним пандемия COVID-19 продемонстрировали важность подготовки медицинских учреждений к таким угрозам [1–3].

Деятельность по сохранению, восстановлению здоровья сама по себе связана с серьезными рисками для здоровья тех, кто эту деятельность осуществляет [4–7]. Работа с пациентами, инфицированными высококонтагиозными респираторными патогенами, влечет за собой дополнительные риски здоровью медицинского персонала, связанные не только с возможностью инфицирования, но и с возрастающими физическими, интеллектуальными, сенсорными, эмоциональными нагрузками, необходимостью длительного использования СИЗ и контакта с дезинфицирующими средствами и антисептиками [8]. С необходимостью длительного использования СИЗ может быть связано повреждение кожных покровов в местах плотного прилегания медицинской маски / респиратора и защитных очков, развитие симптомов теплового стресса при использовании комбинезонов, а также нарушение работоспособности, появление головных болей [9–13]. При этом физический дискомфорт, вызванный эксплуатацией СИЗ, нередко приводит к несоблюдению регламентов их использования: персонал может сознательно сокращать время ношения или полностью отказываться от применения СИЗ, особенно в условиях высокой рабочей нагрузки. Подобные нарушения протоколов инфекционного контроля существенно повышают риск профессионального заражения, нивелируя защитный эффект СИЗ и создавая угрозу как для самих медработников, так и для пациентов [14]. В связи с этим управление профессиональными рисками, включая минимизацию дискомфорта от СИЗ, обеспечение их эргономичности и доступности, а также обучение персонала рациональному использованию средств защиты, становится неотъемлемой частью инфекционного контроля. Такие меры способствуют соблюдению протоколов безопасности, снижая вероятность нарушений и формируя устойчивую систему противоэпидемических мероприятий, направленную на сдерживание внутрибольничного распространения инфекций [15–18] [1].

Разработка и внедрение специальных мер по предотвращению неблагоприятного воздействия факторов производственной среды, связанных со значительным изменением условий труда при перепрофилировании стационаров в неблагоприятный эпидемический период, являются необходимой мерой управления профессиональными рисками здоровью медицинских работников [19, 20]. В этом контексте можно предположить, что медицинский персонал инфекционных больниц, обладающий специфическими знаниями и опытом работы с инфекционными заболеваниями, может быть лучше подготовлен к оказанию медицинской помощи пациентам в условиях пандемии по сравнению с персоналом многопрофильных перепрофилируемых стационаров. Персонал инфекционных больниц имеет более глубокое понимание специфики инфекционных процессов, протоколов инфекционного контроля и мер предосторожности, что может быть критически важным в условиях эпидемий и пандемий.

Таким образом, анализ различий в подготовленности и адаптации медицинского персонала инфекционных и соматических больниц в условиях пандемии представляет собой важное направление исследования, которое может способствовать улучшению стратегий реагирования на будущие биологические угрозы. Комплексный подход к повышению готовности всех типов медицинских учреждений, обеспечению надлежащего обучения и оснащения персонала может существенно повысить эффективность системы здравоохранения в целом при встрече с новыми эпидемическими вызовами.

Цель исследования – оценить субъективное восприятие дискомфорта, связанного с длительным использованием СИЗ, и выявить различия в адаптации к таким условиям работы между медицинским персоналом инфекционных и многопрофильных стационаров в период пандемии COVID-19.

Материалы и методы. Исследование проведено на базе инфекционного и многопрофильного стационаров г. Минска (Республика Беларусь), перепрофилированных для оказания медицинской помощи пациентам с COVID-19. Для изучения субъективного восприятия дискомфорта проведено анкетирование медицинского персонала, включающее вопросы о частоте и длительности использования СИЗ в ежедневной работе (медицинские маски / респираторы, защитные очки, комбинезоны), а также наличии симптомов, свидетельствующих о неблагоприятном воздействии длительного использования СИЗ. Респонденты могли выбрать несколько

[1] ВОЗ: для обеспечения безопасности пациентов необходимо обеспечить безопасность медицинского персонала: пресс-релиз [Электронный ресурс] // Всемирная организация здравоохранения. – URL: https://www.who.int/ru/news/item/17-09-2020-keep-health-workers-safe-to-keep-patients-safe-who (дата обращения: 29.03.2025).

вариантов ответов на вопросы о субъективных симптомах, связанных с использованием СИЗ.

В исследовании приняли участие 103 респондента инфекционной больницы и 95 респондентов многопрофильного стационара. Выборки не имели статистически значимых различий по полу ($p = 0{,}052$), возрасту ($p = 0{,}29$) и стажу работы ($p = 0{,}21$). У всех участников исследования было получено согласие на обработку персональных данных с условием обеспечения анонимности и конфиденциальности.

Ограничением использованного метода субъективной оценки является зависимость данных от точности самоотчетов респондентов, что может приводить к искажению информации из-за когнитивных ошибок, социальной желательности или различий в индивидуальной трактовке вопросов. Это следует учитывать при интерпретации результатов. Однако в контексте данного исследования анкетирование продемонстрировало значимые преимущества: метод обеспечил оперативный сбор данных в условиях чрезвычайной эпидемиологической ситуации, когда применение более ресурсоемких подходов затруднительно; субъективная оценка дискомфорта является важным источником информации о персональном восприятии, определяющем готовность персонала соблюдать протоколы инфекционного контроля. Использование стандартизированной анкеты с бинарными и порядковыми вариантами ответов минимизировало вариативность интерпретации вопросов, а анонимность способствовала снижению социальной желательности в ответах.

Статистическая обработка и анализ полученных данных проводились с использованием статистических пакетов программ Excel, Statistica 13. Анализ данных включал подсчет абсолютных и относительных частот. Для интенсивных показателей рассчитывали доверительный интервал по методу Уилсона (Wilson). Для сравнения качественных порядковых признаков в зависимых группах использовали метод Вилкоксона (Wilcoxon matched pairs test). Значимость различий данных, характеризующих качественные признаки в независимых группах, определяли на основании величины критерия χ^2. Для сравнения частот бинарных признаков в зависимых группах использовали биномиальный тест МакНемара с коррекцией mid-p-значения (McNemar's mid-p-value binomial test), для оценки величины эффекта рассчитывали отношение шансов (Odds Ratio – *OR*) и доверительный интервал *OR*. Для сравнения величин *OR* в двух выборках использовали условное относительное отношение шансов (Conditional Relative Odds Ratio – *CROR*) и доверительный интервал *CROR* [21]. Результаты исследования считали достоверными, различия между показателями – значимыми при вероятности безошибочного прогноза не менее 95,5 % ($p < 0{,}05$).

Результаты и их обсуждение. СИЗ органов дыхания являются необходимой мерой для защиты от респираторных патогенов. Проведенное исследование выявило значительное увеличение частоты использования СИЗ органов дыхания среди медицинских работников в условиях пандемии COVID-19, что согласуется с глобальными рекомендациями по инфекционному контролю. Доля медицинских работников, использующих медицинские маски или респираторы в ежедневной работе, значимо возросла в обоих стационарах с 71,0 (62,5–79,6) до 100 % (96,4–100) ($p < 0{,}001$) в инфекционной больнице и с 91,6 (84,3–95,7) до 100 % (96,1–100) ($p = 0{,}004$) в многопрофильном стационаре, что подчеркивает универсальность принятых мер безопасности. Наряду с увеличением числа медработников, использовавших СИЗ органов дыхания, возросло и время ношения СИЗ в течение рабочей смены, причем данная тенденция была значимо более выражена в инфекционной больнице ($p < 0{,}001$): 87,4 % (79,6–92,5) респондентов инфекционного стационара ($p < 0{,}001$) и 47,4 % (37,6–57,3) респондентов многопрофильного стационара ($p < 0{,}001$) отметили увеличение времени ношения данного вида СИЗ. Рост количества медработников, использовавших маски, также сопровождался увеличением частоты жалоб, связанных с длительным их ношением (табл. 1).

Сравнительный анализ частоты жалоб, связанных с длительным использованием медицинских масок / респираторов, позволил установить следующее. В инфекционном стационаре достоверный рост частоты жалоб в период пандемии в сравнении с работой в штатном режиме наблюдался для следующих симптомов: зуд в носоглоточной области – с 19,4 (12,9–28,1) до 35,0 % (26,4–44,6) ($p = 0{,}002$, $OR = 4{,}2$); затрудненное дыхание – с 20,4 (13,7–29,2) до 39,8 % (30,9–49,5) ($p < 0{,}001$, $OR = 3{,}86$); дискомфорт в области лица и / или заушной области – с 41,8 (32,7–51,4) до 68,0 % (58,4–76,2) ($p < 0{,}001$, $OR = 3{,}46$). В многопрофильном стационаре наиболее выраженный рост отмечен для симптомов: затрудненное дыхание – с 24,2 (16,7–33,7) до 42,1 % (32,7–52,2) ($p < 0{,}001$, $OR = 18{,}0$); головокружение – с 8,4 (4,3–15,8) до 15,8 % (9,8–24,4) ($p = 0{,}022$, $OR = 8{,}0$); дискомфорт в области лица и / или заушной области – с 56,8 (46,8–66,3) до 69,5 % (59,6–77,8) ($p = 0{,}019$, $OR = 2{,}71$); покраснение и / или мацерация в области лица, заушной области – с 40,0 (30,7–50,0) до 50,5 % (40,7–60,4) ($p = 0{,}019$, $OR = 3{,}5$).

Сравнение выраженности различий между стационарами демонстрирует достоверную разницу в распространенности ряда симптомов как при работе в штатном режиме, так и в период перепрофилирования. Так, медицинские работники многопрофильного стационара чаще отмечали у себя наличие следующих жалоб, связанных с использованием СИЗ органов дыхания, при работе в штатном режиме: ощущение нехватки воздуха ($p < 0{,}001$), дискомфорт в области лица и / или заушной области ($p = 0{,}034$), покраснение и / или мацерация в области лица, заушной области ($p < 0{,}001$); при работе в период

Таблица 1

Результаты сравнительного анализа частоты жалоб, связанных с ношением медицинской маски / респиратора

Жалоба	Доля респондентов, имеющих жалобы в штатном режиме работы, %	Доля респондентов, имеющих жалобы в период пандемии COVID-19, %	McNemar's mid-p-value	*OR* (95 % *CI*)	*CROR* (95 % *CI*)
Зуд в носоглоточной области	19,4 / 21,1	35,0 / 23,2	0,002 / 0,581	4,2 (1,58–11,14) / 1,4 (0,44–4,41)	3,0 (0,67–13,53)
Затрудненное дыхание	20,4 / 24,2	39,8 / 42,1	< 0,001 / < 0,001	3,86 (1,68–8,86) / 18,0 (2,40–134,84)	4,66 (0,53–41,19)
Ощущение нехватки воздуха	15,5 / 42,1*	22,3 / 49,5*	0,115 / 0,096	2,17 (0,82–5,70) / 2,4 (0,85–6,81)	1,11 (0,27–4,59)
Головокружение	2,9 / 8,4	3,9 / 15,8*	0,688 / 0,022	1,5 (0,25–8,98) / 8,0 (1,0–63,97)	5,33 (0,34–82,83)
Дискомфорт в области лица и / или заушной области	41,8 / 56,8*	68,0 / 69,5	< 0,001 / 0,019	3,46 (1,77–6,76) / 2,71 (1,14–6,46)	1,28 (0,43–3,82)
Покраснение и / или мацерация в области лица, заушной области	9,7 / 40,0*	5,8 / 50,5*	0,180 / 0,019	3,0 (0,61–14,86) / 3,5 (1,15–10,63)	1,17 (0,17–8,19)

Примечание: данные во 2–4-м столбцах представлены в формате «инфекционный стационар / многопрофильный стационар»; * – статистически значимые различия в распространенности жалоб в стационарах в рамках одного режима работы при $p < 0,05$.

пандемии: ощущение нехватки воздуха ($p < 0,001$), головокружение ($p = 0,005$), покраснение и / или мацерация в области лица, заушной области ($p < 0,001$). Оценка влияния изменения режима работы на частоту жалоб не выявила статистически значимых различий между двумя стационарами, однако можно говорить о наличии некоторых тенденций к более выраженному влиянию пандемии на частоту жалоб на зуд в носоглоточной области (*CROR* = 3,0 (0,67–13,53)) в инфекционном стационаре, затрудненное дыхание (*CROR* = 4,66 (0,53–41,19)) и головокружение (*CROR* = 5,33 (0,34–82,83)) в многопрофильном стационаре. Следует отметить, что широкие доверительные интервалы *CROR*, включающие 1, говорят о значительной неопределенности этих оценок, что частично может быть связано с малым объемом выборок.

Доля работников, использующих защитные очки, существенно увеличилась как в инфекционной больнице (с 25,2 до 91,3 %, $p < 0,001$), так и в многопрофильном стационаре (с 50,5 до 86,3 %, $p < 0,001$). Результаты анализа частоты жалоб, связанных с ношением защитных очков (табл. 2), выявили выраженную динамику в период пандемии COVID-19. В инфекционном стационаре доля медицинских работников, отмечавших дискомфорт в области прилегания очков, увеличилась с 15,5 (9,8–23,8) до 73,8 % (64,6–81,3) ($p < 0,001$), а в многопрофильном – с 27,4 (19,4–37,1) до 56,8 % (46,8–66,3) ($p < 0,001$). Высокие значения *OR* в обоих стационарах (33 и 29) подчеркивают выраженную связь между длительным ношением очков в условиях пандемии и возникновением дискомфорта. Стоит также отметить, что, несмотря на достоверное увеличение времени использования защитных очков в обоих стационарах, медицинские работники многопрофильной больницы чаще указывали на возросшую длительность применения данного вида СИЗ (47,4 и 15,5 % респондентов, $p < 0,001$). При этом сравнение динамики между стационарами (*CROR* = 1,14, (0,07–18,84)) не выявило значимых различий, несмотря на исходно более высокую распространенность жалоб в многопрофильном стационаре в штатном режиме (27,4 против 15,5 %; $p < 0,05$). Кожные реакции, такие как зуд, покраснение и мацерация в области прилегания очков, также демонстрировали выраженный рост: в инфекционном стационаре – с 1,0 (0,2–5,3) до 33,0 % (24,7–42,6) ($p < 0,001$), в многопрофильном – с 5,3 (2,3–11,7) до 22,1 % (14,9–31,5) ($p < 0,001$, *OR* = 17). Указанные изменения могут быть обусловлены механическим давлением, нарушением воздухообмена и накоплением влаги под средствами индивидуальной защиты. Особого внимания заслуживает рост частоты головных болей в многопрофильном стационаре с 12,6 (7,4–20,8) до 31,6 % (23,1–41,5) ($p < 0,001$, *OR* = 19), тогда как в инфекционном стационаре подобная динамика была статистически незначимой ($p = 0,25$).

Существенный рост доли сотрудников, применяющих защитные комбинезоны в период пандемии, отмечен как в инфекционной больнице (с 31,1 до 98,1 %; $p < 0,001$), так и в многопрофильном стационаре (с 30,5 до 92,6 %; $p < 0,001$). Это сопровождалось значительным ростом жалоб на физический дискомфорт и физиологические нарушения (табл. 3), что объясняется существенным увеличением времени использования комбинезонов в ежедневной работе обоих стационаров. Более длительное использование комбинезона в период пандемии отметили 88,4 % (80,7–93,2) опрошенных медработников инфекционной больницы ($p < 0,001$) и 69,5 % (59,6–77,8) респондентов многопрофильного стационара ($p < 0,001$).

Таблица 2

Результаты сравнительного анализа частоты жалоб, связанных с ношением защитных очков

Жалоба	Доля респондентов, имеющих жалобы в штатном режиме работы, %	Доля респондентов, имеющих жалобы в период пандемии COVID-19, %	McNemar's mid-p-value	*OR* (95 % *CI*)	*CROR* (95 % *CI*)
Дискомфорт в области прилегания очков к голове	15,5 / 27,4*	73,8 / 56,8*	< 0,001 / < 0,001	33 (4,51–241,29) / 29 (3,95–212,90)	1,14 (0,07–18,84)
Зуд, покраснение и / или мацерация в области прилегания очков к голове	1,0 / 5,3	33,0 / 22,1	< 0,001 / < 0,001	– / 17 (2,26–127,75)	–
Головная боль	1,0 / 12,6*	2,9 / 31,6*	0,25 / < 0,001	– / 19 (2,54–141,93)	–

Примечание: данные во 2–4-м столбцах представлены в формате «инфекционный стационар / многопрофильный стационар»; * – статистически значимые различия в распространенности жалоб в стационарах в рамках одного режима работы при $p < 0,05$; прочерк подразумевает, что показатель не рассчитывался в связи с ограничениями используемого метода.

Таблица 3

Результаты сравнительного анализа частоты жалоб, связанных с ношением защитного комбинезона

Жалоба	Доля респондентов, имеющих жалобы в штатном режиме работы, %	Доля респондентов, имеющих жалобы в период пандемии COVID-19, %	McNemar's mid-p-value	*OR* (95 % *CI*)	*CROR* (95 % *CI*)
Повышенное потоотделение	24,3 / 17,9	63,1 / 67,4	< 0,001 / < 0,001	41 (5,64–298,07) / 48 (6,63–347,76)	1,17 (0,07–19,31)
Ощущение перегрева тела	5,8 / 12,6	44,7 / 54,7	< 0,001 / < 0,001	– /–	–
Головокружение	1,0 / 2,1	7,8 / 15,8	0,008 / < 0,001	– / 14 (1,84–106,47)	–
Жажда	1,0 / 11,6*	16,5 / 49,5*	< 0,001 / < 0,001	– / 37 (5,08–269,68)	–
Учащенное сердцебиение	3,9 / 4,2	37,9 / 21,1	< 0,001 / < 0,001	– /–	–

Примечание: данные во 2–4-м столбцах представлены в формате «инфекционный стационар / многопрофильный стационар»; * – статистически значимые различия в распространенности жалоб в стационарах в рамках одного режима работы при $p < 0,05$; прочерк подразумевает, что показатель не рассчитывался в связи с ограничениями используемого метода.

Так, в инфекционном стационаре доля респондентов, жалующихся на повышенное потоотделение, увеличилась с 24,3 (17,0–33,4) в штатном режиме до 63,1 % (53,5–71,8) в период пандемии ($p < 0,001$) с оценкой отношения шансов (*OR*), равной 41 (5,64–298,07), а в многопрофильном стационаре наблюдалось возрастание от 17,9 до 67,4 % ($p < 0,001$, $OR = 48$ (6,63–347,76)); сравнительный показатель *CROR* составил 1,17 (0,07–19,31), что указывает на отсутствие статистически значимых различий в относительном влиянии изменения режима работы между учреждениями. Аналогичным образом жалобы на ощущение перегрева тела значительно возросли в обоих стационарах: в инфекционном стационаре наблюдалось увеличение с 5,8 (2,7–12,1) до 44,7 % (35,4–54,3) ($p < 0,001$), а в многопрофильном – с 12,6 (7,4–20,8) до 54,7 % (44,7–64,4) ($p < 0,001$); при этом оценки *OR* не были рассчитаны ввиду методологических ограничений, однако статистическая значимость этих изменений свидетельствует о выраженном воздействии изменившихся условий труда на субъективное восприятие перегрева. Динамика жалоб на головокружение демонстрирует, что в инфекционном стационаре частота данных симптомов выросла с 1,0 (0,2–5,3) до 7,8 % (4,0–14,6) ($p = 0,008$), а в многопрофильном стационаре – с 2,1 (0,6–7,4) до 15,8 % (9,8–24,4) ($p < 0,001$), причем для многопрофильного стационара значение *OR* составило 14 (1,84–106,47), что подчеркивает значительное влияние длительного ношения комбинезона на возникновение головокружения. Число респондентов, отмечающих жажду, также существенно увеличилось: в инфекционном стационаре жалобы возросли с 1,0 (0,2–5,3) до 16,5 % (10,6–24,9) ($p < 0,001$), а в многопрофильном стационаре – с 11,6 (6,6–19,6) до 49,5 %

(39,6–59,4) ($p < 0,001$). Наконец, динамика учащенного сердцебиения показала, что в инфекционном стационаре этот симптом увеличился с 3,9 (1,5–9,6) до 37,9 % (29,1–47,5) ($p < 0,001$), а в многопрофильном стационаре – с 4,2 (1,7–10,3) до 21,1 % (14,1–30,3) ($p < 0,001$). Сравнительный анализ выявил более высокую распространенность жажды в многопрофильном стационаре как в штатном режиме (11,6 против 1,0 %; $p = 0,002$), так и в период пандемии (49,5 против 16,5 %; $p < 0,001$).

Выводы. Пандемия COVID-19 привела к существенному изменению условий труда медицинского персонала и широкому внедрению СИЗ в медицинских учреждениях, что подтверждается достижением 100%-ного охвата использованием масок / респираторов в обоих стационарах, значительным увеличением доли работников, использующих защитные очки и комбинезоны. Универсальным последствием пандемии стало и увеличение времени ношения всех типов СИЗ, что сопровождалось значительным ростом физического и физиологического дискомфорта. Длительное использование СИЗ органов дыхания привело к значимому увеличению частоты жалоб медицинского персонала инфекционной больницы на зуд в носоглоточной области ($p = 0,002$, $OR = 4,2$), затрудненное дыхание ($p < 0,001$, $OR = 3,86$), дискомфорт в области лица и / или заушной области ($p < 0,001$, $OR = 3,46$). Медицинские работники многопрофильного стационара в связи с длительным использованием маски / респиратора в период пандемии достоверно чаще отмечали наличие таких жалоб, как затрудненное дыхание ($p < 0,001$, $OR = 18,0$), головокружение ($p = 0,022$, $OR = 8,0$), дискомфорт в области лица и / или заушной области ($p = 0,019$, $OR = 2,71$), покраснение и / или мацерация в области лица, заушной области ($p = 0,019$, $OR = 3,5$). Сравнение частоты жалоб, связанных с использованием СИЗ органов дыхания в рамках одного режима работы, показало, что работники многопрофильного стационара чаще испытывали дискомфорт при ношении маски / респиратора как в штатном режиме работы, так и в период пандемии. Так, в штатном режиме работы работники многопрофильной больницы чаще предъявляли жалобы на ощущение нехватки воздуха ($p < 0,001$), дискомфорт в области лица и / или заушной области ($p = 0,034$), покраснение и / или мацерацию в области лица, заушной области ($p < 0,001$), в период пандемии – ощущение нехватки воздуха ($p < 0,001$), головокружение ($p = 0,005$), покраснение и / или мацерацию в области лица, заушной области ($p < 0,001$). Стоит отметить, что изменение условий труда и режима использования СИЗ органов дыхания в период пандемии привело к более существенному изменению частоты системных нарушений в многопрофильном стационаре: затрудненное дыхание ($CROR = 4,66$ (0,53–41,19)), ощущение нехватки воздуха ($CROR = 1,11$ (0,27–4,59)), головокружение ($CROR = 5,33$ (0,34–82,83)). Тогда как в инфекционной больнице более выраженные изменения в период пандемии наблюдались для местных реакций: зуд в носоглоточной области ($CROR = 3,0$ (0,67–13,53)), дискомфорт в области лица и / или заушной области ($CROR = 1,28$ (0,43–3,82)).

Изменение длительности и режима использования защитных очков в период пандемии также привело к увеличению жалоб медицинских работников обоих стационаров: в инфекционной больнице – на дискомфорт в области прилегания очков к голове ($p < 0,001$, $OR = 33$), зуд, покраснение и / или мацерацию в области прилегания очков к голове ($p < 0,001$); в многопрофильном стационаре – на дискомфорт в области прилегания очков к голове ($p < 0,001$, $OR = 29$), зуд, покраснение и / или мацерацию в области прилегания очков к голове ($p < 0,001$, $OR = 17$), головную боль ($p < 0,001$, $OR = 19$). Сравнение частоты жалоб, связанных с использованием защитных очков в двух стационарах в рамках одного режима работы, позволило установить, что в целом работники многопрофильного стационара так же, как и при ношении медицинских масок, чаще указывают на физический дискомфорт в обоих режимах работы, что проявляется такими жалобами, как дискомфорт в области прилегания очков к голове ($p = 0,042$), головная боль ($p < 0,001$) в штатном режиме работы, и головная боль – во время пандемии COVID-19 ($p = 0,023$).

Использование защитного комбинезона при оказании медицинской помощи пациентам с COVID-19 сопровождалось значительным увеличением частоты всех жалоб как в инфекционной больнице, так и в многопрофильном стационаре. Однако медицинские работники многопрофильной больницы чаще испытывали жажду при ношении комбинезона как в штатном режиме работы ($p = 0,002$), так и в период пандемии ($p < 0,001$).

Более частое предъявление жалоб, связанных с использованием СИЗ в обоих режимах работы, а также более существенное изменение частоты системных физиологических нарушений при ношении СИЗ органов дыхания в период пандемии в многопрофильном стационаре может указывать на большую адаптацию медицинских работников инфекционной больницы к длительному использованию СИЗ, что может быть связано с использованием более строгих протоколов инфекционного контроля, отработанными алгоритмами работы в обычных условиях повседневной работы. Широкие доверительные интервалы *CROR*, однако, указывают на необходимость осторожной интерпретации межстационарных различий, что может быть связано с недостаточным объемом выборки, а также

вариативностью соблюдения правил эксплуатации СИЗ среди персонала.

Полученные данные могут указывать на формирование у медицинского персонала инфекционных стационаров физиологических компенсаторных механизмов, связанных с регулярным использованием СИЗ органов дыхания. Возможно, длительная работа в условиях умеренной гипоксии стимулирует адаптационные процессы (повышение эффективности утилизации кислорода тканями, оптимизация дыхательного ритма и усиление капиллярного кровотока). Эти изменения могут также быть результатом поведенческих навыков, выработанных в ходе ежедневной практики (например, техники контролируемого дыхания для минимизации дискомфорта).

Такие различия в уровне подготовленности и адаптации медицинских работников к использованию СИЗ в условиях перепрофилирования стационара свидетельствуют о необходимости более широкого внедрения дополнительных мероприятий по управлению профессиональными рисками здоровью, связанными с использованием СИЗ, в учреждениях здравоохранения, оказывающих медицинскую помощь в период эпидемического подъема заболеваемости респираторными инфекциями.

Для достижения сопоставимого уровня адаптации целесообразно реализовать поэтапные тренировочные программы, моделирующие рабочие сценарии с продолжительным использованием СИЗ. В целях управления профессиональным риском здоровью также необходимо проведение регулярного медицинского скрининга, включающего оценку функции внешнего дыхания, что может использоваться для определения группы риска по развитию гипоксии, обучение персонала самодиагностике ранних симптомов кислородного голодания, таких как тахикардия, головокружение или когнитивная дисфункция, а также разработка персонализированных рекомендаций по режимам эксплуатации СИЗ, учитывающих индивидуальные адаптационные резервы медицинских работников.

Таким образом, для многопрофильных стационаров важно трансформировать меры, применяемые в период пандемий, в систему непрерывной подготовки и превентивного медицинского контроля. Реализация таких мер в межэпидемический период позволит сформировать достаточный уровень готовности к будущим эпидемическим вызовам, связанным с необходимостью длительного использования средств индивидуальной защиты.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках задания «Разработать и внедрить метод управления профессиональным риском здоровью медицинских работников организаций здравоохранения, оказывающих медицинскую помощь в стационарных условиях в период эпидемического подъема заболеваемости респираторными инфекциями» подпрограммы «Безопасность среды обитания человека» государственной научно-технической программы «Научно-техническое обеспечение качества и доступности медицинских услуг» на 2021–2025 годы, заказчиком которой является Министерство здравоохранения Республики Беларусь.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Усвоение уроков в свете пандемии. Новая стратегия в области охраны здоровья и устойчивого развития: обзор доказательственной базы для Общеевропейской комиссии по вопросам здоровья и устойчивого развития / под ред. проф. M. McKee. [Электронный ресурс] // Европейская обсерватория по системам и политике здравоохранения. – URL: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/367235/9789289051880-rus.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 14.04.2025).

2. Доклад о состоянии здравоохранения в Европе 2024 г.: сохранить первоочередное внимание к вопросам здоровья. Основные положения // Всемирная организация здравоохранения. Европейский регион. – Копенгаген: Европейское региональное бюро ВОЗ, 2025. – 13 с.

3. Как коронавирусная инфекция изменила положение в области окружающей среды и охраны здоровья: аналитическая записка // Всемирная организация здравоохранения. Европейский регион. – Копенгаген: Европейское региональное бюро ВОЗ, 2023. – 45 с.

4. Психосоциальные производственные факторы и риск нарушений здоровья медицинских работников / Ю.Ю. Горблянский, Е.П. Конторович, О.П. Понамарева, Е.И. Волынская, В.Н. Крищенко // Южно-Российский журнал терапевтической практики. – 2020. – Т. 1, № 3. – С. 27–36. DOI: 10.21886/2712-8156-2020-1-3-27-36

5. Анализ профессиональных факторов риска развития болезней системы кровообращения у медицинских работников: обзор литературы / Л.М. Карамова, Э.Т. Валеева, Н.В. Власова, Р.Р. Галимова, Г.Р. Башарова // Анализ риска здоровью. – 2021. – № 4. – С. 173–180. DOI: 10.21668/health.risk/2021.4.19

6. Сравнительная оценка рисков инфицирования SARS-CoV-2 у работников медицинских организаций крупного промышленного города в период пандемии / С.С. Смирнова, И.А. Егоров, Н.Н. Жуйков, Л.Г. Вяткина, А.Н. Харитонов, А.В. Семенов, О.В. Морова // Анализ риска здоровью. – 2022. – № 2. – С. 139–150. DOI: 10.21668/health.risk/2022.2.13

7. Субъективная оценка факторов профессионального риска для здоровья и психоэмоционального состояния медицинских работников в изменившихся условиях труда в период пандемии COVID-19 / Е.А. Гутич, Г.Е. Косяченко, С.И. Сычик, Е.А. Николаева, И.В. Мадекша // Анализ риска здоровью. – 2023. – № 3. – С. 112–122. DOI: 10.21668/health.risk/2023.3.11

8. Риск инфицирования COVID-19 у медицинских работников клинической больницы в период пандемии / Л.П. Кузьмина, Л.М. Лескина, Н.П. Головкова, Д.А. Толмачев, Н.И. Измерова, П.Ш. Османова // Медицина труда и промышленная экология. – 2024. – Т. 64, № 11. – С. 748–754. DOI: 10.31089/1026-9428-2024-64-11-748-754

9. Facial personal protective equipment: materials, resterilization methods, and management of occupation-related dermatoses / J. Yu, A. Goldminz, S. Chisolm, S.E. Jacob, J.H. Zippin, P.A. Wu, S. Hylwa, C.A. Dunnick [et al.] // Dermatitis. – 2021. – Vol. 32, № 2. – P. 78–85. DOI: 10.1097/DER.0000000000000699

10. Contact dermatitis caused by prevention measures during the COVID-19 pandemic: a narrative review / H. Tang, H. Wang, M.R. Hamblin, L. Jiang, Y. Zhou, Y. Xu, X. Wen // Front. Public Health. – 2023. – Vol. 11. – P. 1189190. DOI: 10.3389/fpubh.2023.1189190

11. Manookian A., Dehghan Nayeri N., Shahmari M. Physical problems of prolonged use of personal protective equipment during the COVID-19 pandemic: a scoping review // Nurs. Forum. – 2022. – Vol. 57, № 5. – P. 874–884. DOI: 10.1111/nuf.12735

12. Zarei N., Negarandeh R., Eghbali M. Prevalence of headaches in healthcare workers while using personal protective equipment during the COVID-19 pandemic: a systematic review and meta-analysis // BMJ Open. – 2024. – Vol. 14, № 5. – P. e074596. DOI: 10.1136/bmjopen-2023-074596

13. Батов В.Е., Кузнецов С.М. Оценка средств индивидуальной защиты медицинского персонала, применяемых в период пандемии новой коронавирусной инфекции // Известия Российской военно-медицинской академии. – 2022. – Т. 41, № 1. – С. 77–82. DOI: 10.17816/rmmar84027

14. Literature review of physiological strain of personal protective equipment on personnel in the high-consequence infectious disease isolation environment / C.E. Figi, J.J. Herstein, E.L. Beam, A.B. Le, A.L. Hewlett, J.V. Lawler, J.J. Lowe, S.G. Gibbs // Am. J. Infect. Control. – 2023. – Vol. 51, № 12. – P. 1384–1391. DOI: 10.1016/j.ajic.2023.05.005

15. Barriers and facilitators to healthcare workers' adherence with infection prevention and control (IPC) guidelines for respiratory infectious diseases: a rapid qualitative evidence synthesis / C. Houghton, P. Meskell, H. Delaney, M. Smalle, C. Glenton, A. Booth, X.H.S. Chan, D. Devane, L.M. Biesty // Cochrane Database Syst. Rev. – 2020. – Vol. 4, № 4. – P. CD013582. DOI: 10.1002/14651858.CD013582

16. An integrated strategy for the prevention of SARS-CoV-2 infection in healthcare workers: a prospective observational study / A.M. Cattelan, L. Sasset, E. Di Meco, S. Cocchio, F. Barbaro, S. Cavinato, S. Gardin, G. Carretta [et al.] // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2020. – Vol. 17, № 16. – P. 5785. DOI: 10.3390/ijerph17165785

17. Factors influencing compliance with Personal Protective Equipment (PPE) use among healthcare workers / J. George, N. Shafqat, R. Verma, A.B. Patidar // Cureus. – 2023. – Vol. 15, № 2. – P. e35269. DOI: 10.7759/cureus.35269

18. Factors affecting healthcare workers' compliance with social and behavioural infection control measures during emerging infectious disease outbreaks: rapid evidence review / S.K. Brooks, N. Greenberg, S. Wessely, G.J. Rubin // BMJ Open. – 2021. – Vol. 11, № 8. – P. e049857. DOI: 10.1136/bmjopen-2021-049857

19. Перепрофилирование многопрофильного стационара в инфекционный госпиталь и работа в условиях пандемии коронавирусной инфекции / В.И. Вечорко, О.В. Аверков, Б.В. Силаев, Е.А. Женина, В.А. Горбачева, О.А. Шапсигова, О.В. Таньшина, С.А. Гуменюк // Диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции. Организация работы в условиях многопрофильного стационара: руководство для врачей / под ред. В.И. Вечорко. – М.: Практика, 2020. – С. 25–40. DOI: 10.51833/9785898161804_25

20. Реорганизация многопрофильного стационара в условиях неблагоприятной эпидемиологической обстановки / А.Э. Никитин, И.А. Знаменский, Ю.А. Шихова, И.В. Кузьмина, Д.С. Мельченко, Н.Л. Алешенко, С.А. Корвяков, А.В. Созыкин [и др.] // Медико-фармацевтический журнал «Пульс». – 2020. – Т. 22, № 10. – С. 43–47. DOI: 10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-10-43-47

21. Suzuki S. Conditional relative odds ratio and comparison of accuracy of diagnostic tests based on 2 × 2 tables // J. Epidemiol. – 2006. – Vol. 16, № 4. – P. 145–153. DOI: 10.2188/jea.16.145

Оценка относительного риска дискомфорта и его субъективное восприятие при использовании средств индивидуальной защиты: различия в адаптации персонала инфекционных и многопрофильных стационаров во время пандемии COVID-19 / Е.А. Гутич, С.Л. Итпаева-Людчик, Е.А. Николаева, И.В. Мадекша // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 2. – С. 145–154. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.12

UDC 614.89:614.253:[616.98-036.22:578.834.1SARS-CoV-2
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.12.eng

Read online

Research article

ASSESSMENT OF RELATIVE RISK OF DISCOMFORT AND ITS SUBJECTIVE PERCEPTION ASSOCIATED WITH PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT: ADAPTATION DIFFERENCES AMONG STAFF IN INFECTIOUS DISEASE AND MULTIDISCIPLINARY HOSPITALS DURING THE COVID-19 PANDEMIC

K.A. Hutsich, S.L. Itpayeva-Liudchyk, K.A. Nikalayeva, I.V. Madeksha

Research Institute of Hygiene, Toxicology, Epidemiology, Virology and Microbiology of the state institution «Republican Center of Hygiene, Epidemiology and Public Health», 8 Akademicheskaya St., Minsk, 220012, Republic of Belarus

The object of the study was represented by healthcare workers from infectious disease and multidisciplinary hospitals repurposed to treat COVID-19 patients.

The aim of the study was to assess subjective perception of discomfort associated with prolonged use of personal protective equipment (PPE) and to identify differences in adaptation to such working conditions between healthcare staff in infectious disease and multidisciplinary hospitals during the COVID-19 pandemic.

A survey was conducted among healthcare workers, including questions on daily duration of PPE use (medical masks/respirators, protective goggles, coveralls) and the presence of symptoms indicating adverse effects of prolonged PPE using.

Changes in working conditions during the COVID-19 pandemic led to a significant increase in the proportion of healthcare workers regularly using PPE as well as a substantial rise in duration of its use. Prolonged PPE use during the pandemic resulted in an increased frequency of complaints related to PPE in both hospital types. Higher prevalence of complaints associated with PPE use was observed in the multidisciplinary hospital, both during routine and repurposing periods, as well as a greater change in the frequency of systemic physiological disorders while wearing respiratory PPE (difficulty breathing, sensation of shortness of breath, dizziness) during the pandemic in the multidisciplinary hospital compared to the infectious disease hospital. The identified inter-hospital differences likely reflect greater adaptability among staff in infectious disease hospitals to prolonged PPE use attributed to stringent infection control protocols and the availability of well-tested algorithms for working in routine daily practice.

These disparities in preparedness and adaptation of healthcare workers to PPE use in repurposed hospitals highlight the need for expanded implementation of occupational health risk management measures, emphasize the importance of optimizing PPE design, improving selection and usage protocols, introducing training programs on rational PPE use, and conducting regular health screenings for PPE-related adverse effects among healthcare workers.

Keywords: *COVID-19, pandemic, healthcare workers, occupational health risks, subjective complaints, personal protective equipment (PPE), medical masks, protective goggles, protective coveralls.*

References

1. Drawing light from the pandemic: a new strategy for health and sustainable development – A review of the evidence. In: M. McKee ed. *World Health Organization. Regional Office for Europe*. Available at: https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289051798 (April 14, 2025).

2. European health report 2024: keeping health high on the agenda: highlights. *World Health Organization, European Region*. Copenhagen, World Health Organization, Regional Office for Europe, 2025.

3. How coronavirus disease has changed the environment and health landscape: a policy brief. *World Health Organization, European Region.* Copenhagen, World Health Organization, Regional Office for Europe, 2023.

© Hutsich K.A., Itpayeva-Liudchyk S.L., Nikalayeva K.A., Madeksha I.V., 2025

Katsiaryna A. Hutsich – Candidate of Medical Sciences, Head of the Laboratory of Applied Toxicology and Medical Device Safety (e-mail: ekhutsich@gmail.com; tel.: +375 17 378-80-56, +375 29 694-06-18; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1910-6556).

Sviatlana L. Itpayeva-Liudchyk – Candidate of Medical Sciences, Academic Secretary (e-mail: itpaeva.ludchik@gmail.com; tel.: +375 17 320-02-17; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4878-2246).

Katsiaryna A. Nikalayeva – Head of the Laboratory of Occupational Health Risk Assessment (e-mail: katya-nik@tut.by; tel.: +375 17 351-72-18; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7757-8631).

Iryna V. Madeksha – Junior Researcher at the Laboratory of Occupational Health Risk Assessment (e-mail: ira-kyz@tut.by; tel.: +375 17 351-72-18; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6275-4746).

4. Gorblyansky Y.Y., Kontorovich E.P., Ponamareva O.P., Volynskaya E.I., Krishchenko V.N. Psychosocial occupational factors and the risk of health issues in healthcare workers. *Yuzhno-Rossiiskii zhurnal terapevticheskoi praktiki*, 2020, vol. 1, no. 3, pp. 27–36. DOI: 10.21886/2712-8156-2020-1-3-27-36 (in Russian).

5. Karamova L.M., Valeeva E.T., Vlasova N.V., Galimova R.R., Basharova G.R. Analysis of occupational risk factors causing diseases of the circulatory system in medical workers: literature review. *Health Risk Analysis*, 2021, no. 4, pp. 171–177. DOI: 10.21668/health.risk/2021.4.19.eng

6. Smirnova S.S., Egorov I.A., Zhuikov N.N., Vyatkina L.G., Kharitonov A.N., Semenov A.V., Morova O.V. Risks of becoming infected with SARS-CoV-2 for medical personnel in a large industrial city during the pandemic: comparative assessment. *Health Risk Analysis*, 2022, no. 2, pp. 139–150. DOI: 10.21668/health.risk/2022.2.13.eng

7. Hutsich K.A., Kosiachenko G.E., Sychik S.I., Nikalayeva E.A., Madeksha I.V. Subjective assessment of occupational risk factors for health and psychoemotional state of health care workers under changed working conditions during the COVID-19 pandemic. *Health Risk Analysis*, 2023, no. 3, pp. 98–108. DOI: 10.21668/health.risk/2023.3.11.eng

8. Kuzmina L.P., Leskina L.M., Golovkova N.P., Tolmachev D.A., Izmerova N.I., Osmanova P.Sh. The risk of COVID-19 infection in medical workers of a clinical hospital during a pandemic. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2024, vol. 64, no. 11, pp. 748–754. DOI: 10.31089/1026-9428-2024-64-11-748-754 (in Russian).

9. Yu J., Goldminz A., Chisolm S., Jacob S.E., Zippin J.H., Wu P.A., Hylwa S., Dunnick C.A. [et al.]. Facial personal protective equipment: materials, resterilization methods, and management of occupation-related dermatoses. *Dermatitis*, 2021, vol. 32, no. 2, pp. 78–85. DOI: 10.1097/DER.0000000000000699

10. Tang H., Wang H., Hamblin M.R., Jiang L., Zhou Y., Xu Y., Wen X. Contact dermatitis caused by prevention measures during the COVID-19 pandemic: a narrative review. *Front. Public Health*, 2023, vol. 11, pp. 1189190. DOI: 10.3389/fpubh.2023.1189190

11. Manookian A., Dehghan Nayeri N., Shahmari M. Physical problems of prolonged use of personal protective equipment during the COVID-19 pandemic: a scoping review. *Nurs. Forum*, 2022, vol. 57, no. 5, pp. 874–884. DOI: 10.1111/nuf.12735

12. Zarei N., Negarandeh R., Eghbali M. Prevalence of headaches in healthcare workers while using personal protective equipment during the COVID-19 pandemic: a systematic review and meta-analysis. *BMJ Open*, 2024, vol. 14, no. 5, pp. e074596. DOI: 10.1136/bmjopen-2023-074596.

13. Batov V.E., Kuznetsov S.M. Assessment of personal protective equipment for medical personnel during a new coronavirus pandemic. *Izvestiya Rossiiskoi voenno-meditsinskoi akademii*, 2022, vol. 41, no. 1, pp. 77–82. DOI: 10.17816/rmmar84027 (in Russian).

14. Figi C.E., Herstein J.J., Beam E.L., Le A.B., Hewlett A.L., Lawler J.V., Lowe J.J., Gibbs S.G. Literature review of physiological strain of personal protective equipment on personnel in the high-consequence infectious disease isolation environment. *Am. J. Infect. Control*, 2023, vol. 51, no. 12, pp. 1384–1391. DOI: 10.1016/j.ajic.2023.05.005

15. Houghton C., Meskell P., Delaney H., Smalle M., Glenton C., Booth A., Chan X.H.S., Devane D., Biesty L.M. Barriers and facilitators to healthcare workers' adherence with infection prevention and control (IPC) guidelines for respiratory infectious diseases: a rapid qualitative evidence synthesis. *Cochrane Database Syst. Rev.*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. CD013582. DOI: 10.1002/14651858.CD013582

16. Cattelan A.M., Sasset L., Di Meco E., Cocchio S., Barbaro F., Cavinato S., Gardin S., Carretta G. [et al.]. An integrated strategy for the prevention of SARS-CoV-2 infection in healthcare workers: a prospective observational study. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2020, vol. 17, no. 16, pp. 5785. DOI: 10.3390/ijerph17165785

17. George J., Shafqat N., Verma R., Patidar A.B. Factors influencing compliance with Personal Protective Equipment (PPE) use among healthcare workers. *Cureus*, 2023, vol. 15, no. 2, pp. e35269. DOI: 10.7759/cureus.35269

18. Brooks S.K., Greenberg N., Wessely S., Rubin G.J. Factors affecting healthcare workers' compliance with social and behavioural infection control measures during emerging infectious disease outbreaks: rapid evidence review. *BMJ Open*, 2021, vol. 11, no. 8, pp. e049857. DOI: 10.1136/bmjopen-2021-049857

19. Vechorko V.I., Averkov O.V., Silaev B.V., Zhenina E.A., Gorbachyova V.A., Shapsigova O.A., Tan'shina O.V., Gumenyuk S.A. Reprofiling of a multispecialty hospital into an infectious hospital and the work under coronavirus pandemic conditions. *Diagnostika i lechenie novoi koronavirusnoi infektsii. Organizatsiya raboty v usloviyakh mnogoprofil'nogo statsionara: rukovodstvo dlya vrachei [Diagnosis and treatment of the new coronavirus infection. Organization of work in a multidisciplinary hospital: a guide for doctors]*. In: V.I. Vechorko ed. Moscow, Praktika Publ., 2020, pp. 25–40 (in Russian).

20. Nikitin A.E., Znamenskiy I.A., Shikhova Yu.A., Kuzmina I.V., Melchenko D.S., Aleshenko N.L., Korvyakov S.A., Sozykin A.V. [et al.]. Reorganization of a multi-specialty hospital in an unfavorable epidemiological situation. *Mediko-farmatsevticheskii zhurnal «Pul's»*, 2020, vol. 22, no. 10, pp. 43–47. DOI: 10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-10-43-47 (in Russian).

21. Suzuki S. Conditional relative odds ratio and comparison of accuracy of diagnostic tests based on 2 × 2 tables. *J. Epidemiol.*, 2006, vol. 16, no. 4, pp. 145–153. DOI: 10.2188/jea.16.145

Hutsich K.A., Itpayeva-Liudchyk S.L., Nikalayeva K.A., Madeksha I.V. Assessment of relative risk of discomfort and its subjective perception associated with personal protective equipment: adaptation differences among staff in infectious disease and multidisciplinary hospitals during the COVID-19 pandemic. Health Risk Analysis, 2025, no. 2, pp. 145–154. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.12.eng

Получена: 17.03.2025
Одобрена: 25.04.2025
Принята к публикации: 14.06.2025

УДК 614.2
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.13

Читать онлайн

Научная статья

УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ НИЗКОЙ УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ РАБОТОЙ И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ВЫГОРАНИЯ ВРАЧЕЙ ОБЩЕЙ ПРАКТИКИ

А.Б. Зудин, М.А. Кузнецова, Т.П. Васильева

Национальный научно-исследовательский институт общественного здоровья имени Н.А. Семашко, Российская Федерация, 105064, г. Москва, ул. Воронцово поле, 12, стр. 1

Повышенные требования к работе, сопровождающиеся длительным периодом беспрерывного воздействия, являются наиболее распространенными предикторами развития синдрома выгорания медицинских работников. Большая вариативность российских и зарубежных данных о распространенности выгорания среди медицинских работников свидетельствует о неучтенных факторах, определяющих разные уровни исследуемого явления, а также нерешенности оценочных и технологических подходов к ранней профилактике в рамках управления трудовыми ресурсами здравоохранения.

Создана модели по прогнозу и управлению рисками выгорания врачей общей практики. Проведен опрос врачей общей практики (ВОП, n = 340) медицинских организаций г. Москвы в период с 2022 по 2023 гг. Применена адаптированная для медицинских работников русскоязычная версия международного психосоциального опросника COPSOQ III (Long version). Определены уровни выгорания врачей с низкой удовлетворенностью работой врачей с достоверностью $p \leq 0,05$ по критерию Краскела – Уоллиса. Расчет прогноза проводился методом линейного регрессионного анализа, модели качественных целевых переменных – по методу «Древо решений». В качестве количественной меры эффектов были вычислены относительные риски и отношение шансов (95 % CI).

Подтверждены статистически значимые различия по 38 психосоциальным факторам на уровне $p < 0,0001$. В репрезентативной выборке врачей с низким удовлетворением от работы высокий уровень выгорания ВОП составил 1,72 %, «норма» – 43,10 %, «низкий» – 55,18 %. На примере модели «Древо решений» показан алгоритм управления оценочными параметрами, значимых в управлении рисками низкого уровня удовлетворенности работой, и, как следствие, – профессиональным выгоранием врачей общей практики, зависящих от внутриорганизационных психосоциальных факторов «Неуверенность в условиях труда», «Конфликты на рабочем месте» и «Депрессивные симптомы» и способствующих увеличению до 80 % или снижению до 3,0 % в зависимости от воздействия в производственной среде.

Обосновано, что повышение медико-социальной эффективности трудовых ресурсов может быть основано на применении разработанных организационных технологий превенции критических уровней низкой удовлетворенности работой и выгорания ВОП, профилактике снижения качества оказания медицинской помощи. Алгоритм управления рисками предлагает учитывать уровни выраженности их неудовлетворенности работой, выгорания и факторов наибольшего влияния психосоциальных условий работы и индивидуальных особенностей ВОП.

Ключевые слова: *выгорание, удовлетворенность работой, психосоциальные факторы риска, врачи общей практики, прогноз, модели управления рисками, кадровый ресурс, оценочные технологии превенции.*

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) характеризует выгорание как синдром, возникающий в результате хронического, неуправляемого стресса на рабочем месте[1]. Согласно Международной статистической классификации болезней и проблем, связанных со здоровьем, одиннадцатого пересмотра (МКБ-11)[2], выгорание определяется, исходя из трех составляющих: чувство истощения; повышенная ментальная дистанция от своей работы или чувство негативизма (цинизма) по отношению к своей работе;

© Зудин А.Б., Кузнецова М.А., Васильева Т.П., 2025

Зудин Александр Борисович – доктор медицинских наук, директор (e-mail: info@nriph.ru; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6966-5559).

Кузнецова Мария Анатольевна – младший научный сотрудник (e-mail: mascha.kuznetsova@yandex.ru; тел.: 8 (926) 878-06-67; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8243-5902).

Васильева Татьяна Павловна – доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник (e-mail: vasileva_tp@mail.ru; ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4831-1783).

[1] Burnout an «occupational phenomenon»: International Classification of Diseases [Электронный ресурс] // World Health Organization. – 2019. – URL: https://www.who.int/news/item/28-05-2019-burn-out-an-occupational-phenomenon-international-classification-of-diseases (дата обращения: 27.02.2025).

[2] МКБ-11 для ведения статистики смертности и заболеваемости. QD85 Выгорание [Электронный ресурс] // ВОЗ. – URL: https://icd.who.int/browse/2025-01/mms/ru#129180281 (дата обращения: 27.02.2025).

и чувство неэффективности и отсутствия достижений и включает выгорание в число факторов, влияющих на состояние здоровья, которое классифицируется не как медицинское состояние, а как состояние, связанное с работой [1, 2]. Среди врачей общей практики (ВОП) выгорание является серьезной глобальной проблемой. По различным измерениям высокая распространенность выгорания среди врачей во всем мире варьируется от 6 до 33 % [3]. По отдельным данным уровень эмоционального истощения врачей фиксируют в пределах от 37 до 88,6 %, деперсонализации – от 28 до 82,8 %, и по собственной их оценке он составляет от 19,6 до 29,28 % [3, 4].

Установлено, что работники здравоохранения особенно подвержены развитию выгорания из-за значительного времени интенсивной работы и тесного взаимодействия с другими людьми [5, 6].

Выгорание может привести к повышенному риску медицинских ошибок с потенциальным ущербом для безопасности пациентов и связано с развитием негативных последствий, включая цинизм, истощение и развитие депрессии [7, 8]. В ряде работ показано, что выгорание связано с таким медицинским состоянием, как депрессия, тревожность, бессонница, когнитивные нарушения, сердечно-сосудистые заболевания и нарушения обмена веществ[3] [9].

Таким образом, выгорание следует рассматривать как важную проблему общественного здравоохранения, которая требует изучения и оценки для разработки и принятия мер профилактики и, при необходимости, лечебных вмешательств [10–12].

Вместе с тем известно, что высокая степень выгорания врачей увеличивает финансовое бремя на здравоохранение из-за низкой производительности, невыходов на работу, смены специализации и перехода в другие профессии, то есть потерю трудовых ресурсов [13–15].

Исходя из значимости сохранения трудовых ресурсов и профессиональной эффективности работы врачей, снижение внутриорганизационных и индивидуальных факторов риска в профессиональной деятельности относится к стратегии эффективного управления кадровым ресурсом и производственными факторами, определяющими их благополучие.

В связи с этим цель исследования – создание прогностической модели психосоциальных рисков низкой удовлетворенности работой и профессионального выгорания врачей общей практики для научного обоснования положения об управляемости внутриорганизационных процессов в медицинских организациях, направленных на профилактику.

Материалы и методы. Для установления причинно-следственных взаимосвязей между предикторами низкой удовлетворенности работой и профессионального выгорания ВОП были проведены корреляционный и регрессионные анализы, рассчитаны относительный (*RR*) риск и отношение шансов (*OR*) по международному опроснику COPSOQ III (Long version). Анализ психосоциальных рисков низкой удовлетворенности работой и выгорания проводился на основании расчетов точек отсечения верхнего уровня межквартильного интервала – 75 % и выше (Q3 >) (метод интерквартильного ранжирования). Для проверки точности теста определялись параметры специфичности (*ST*) и чувствительности (*Se*) по каждому фактору риска. Применен анализ бинарных показателей рисковых классов с применением метода «Древо решений». Параметры проверочных тестов соотношений между множественными факторами проанализированы с применением ROC-кривых. Первичные данные проанализированы методами качественной и количественной статистики с использованием пакета Statistica 10.

Исследование одобрено на заседании Независимого этического комитета ФГБНУ «Национальный НИИ общественного здоровья имени Н.А. Семашко» (Протокол № 2 от 17.05.2022). От всех участников было получено информированное согласие.

Результаты и их обсуждение. Проведены исследования факторов, определяющие разные уровни показателей «Удовлетворенность работой» и «Выгорание» ВОП по 37 психосоциальным факторам опросника COSPOQ III (long version) (табл. 1).

Показано, что показатель «Выгорание» имеет тесную взаимосвязь со всеми определяющими факторами показателя «Удовлетворенность работой». Выявлена прямо пропорциональная связь показателя с перечнем из 15 значимых факторов воздействия на формирование выгорания врачей («Количественные требования», «Темп работы», «Когнитивные требования», «Эмоциональные требования», «Требование скрывать эмоции», «Значение работы», «Конфликт ролей», «Отсутствие гарантии занятости», «Неуверенность в условиях труда», «Конфликты на рабочем месте», «Проблемы со сном», «Стресс», «Соматический стресс», «Когнитивный стресс», «Депрессивные симптомы»), а также обратная связь с 21 фактором с незначительным влиянием (со знаком «минус» в перечне) в МО г. Москвы ($p \leq 0{,}01$).

На основе интерквартильного ранжирования были выделены три группы уровней влияния исследуемых психосоциальных факторов на показатель «Выгорание»: «низкий» ($n = 77$), «норма» ($n = 205$) и «высокий» ($n = 58$), и обоснованы достоверные различия между ними (табл. 2).

Учитывая, что у врачей показатель «Выгорание» достоверно связан с уровнем показателя «Удовлетворение от работы», проанализированы и установлены достоверные связи между этими показателями в группах сравнения «низкий», «норма», «высокий» уровни (табл. 3), что визуализировано на рис. 1.

---

[3] Chronic burnout, somatic arousal and elevated salivary cortisol levels / S. Melamed, U. Ugarten, A. Shirom, L. Kahana, Y. Lerman, P. Froom // J. Psychosom. Res. – 1999. – Vol. 46, № 6. – P. 591–598. DOI: 10.1016/s0022-3999(99)00007-0

Таблица 1

Взаимосвязь психосоциальных факторов риска, фактора «Удовлетворение от работы» и фактора «Выгорание»

Психосоциальный фактор	Удовлетворение от работы	Выгорание
Количественные требования	-0,46**	0,39**
Темп работы	-0,09	0,31**
Когнитивные требования	-0,08	0,33**
Эмоциональные требования	-0,28**	0,43**
Требование скрывать эмоции	-0,17**	0,24**
Влияние на работе	0,34**	-0,27**
Возможности для развития	0,42**	-0,28**
Разнообразие в работе	0,17**	-0,28**
Контроль рабочего времени	0,28**	-0,37**
Значение работы	0,10	0,13*
Предсказуемость	0,43**	-0,16**
Признание	0,66**	-0,46**
Осознание роли	0,51**	-0,22**
Конфликт ролей	-0,51**	0,32**
Необоснованные задания	-0,53**	0,41**
Качества руководства	0,68**	-0,47**
Социальная поддержка руководства	0,58**	-0,47**
Социальная поддержка коллег	0,46**	-0,38**
Чувство коллективизма	0,53**	-0,37**
Преданность работе	0,7**	-0,45**
Вовлеченность в работу	0,44**	-0,16**
Отсутствие гарантии занятости	-0,2**	0,28**
Неуверенность в условиях труда	-0,34**	0,37**
Качество работы	0,48**	-0,2**
Удовлетворение от работы	1	-0,5**
Конфликты на рабочем месте	-0,35**	0,34**
Горизонталь доверия	0,22**	-0,17**
Вертикаль доверия	0,49**	-0,3**
Справедливая организация труда	0,67**	-0,56**
Здоровье	0,34**	-0,34**
Самооценка здоровья	0,38**	-0,44**
Проблемы со сном	-0,47**	0,69**
Выгорание	-0,5**	1
Стресс	-0,5**	0,65**
Соматический стресс	-0,42**	0,59**
Когнитивный стресс	-0,48**	0,5**
Депрессивные симптомы	-0,57**	0,56**
Самоэффективность	0,38**	-0,29**

Примечание: * – $p = 0,05$; ** – $p = 0,01$.

Таблица 2

Сравнение трех групп фактора «Выгорание» по психосоциальным факторам

Психосоциальные факторы	$M \pm S$ ($n = 77$), низкий	$M \pm S$ ($n = 205$), норма	$M \pm S$ ($n = 58$), высокий	Уровень P			
				$df = 2$	низкий – норма	низкий – высокий	норма – высокий
Количественные требования	143,18 ± 68,90	183,54 ± 65,54	214,22 ± 56,02	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0097
Темп работы	197,86 ± 75,70	241,05 ± 48,42	250,81 ± 56,53	< 0,0001	0,0001	< 0,0001	0,2389
Когнитивные требования	289,52 ± 67,62	314,94 ± 54,28	340,52 ± 47,49	< 0,0001	0,0192	< 0,0001	0,0033
Эмоциональные требования	165,74 ± 65,97	219,48 ± 47,80	238,53 ± 57,27	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0478
Требование скрывать эмоции	253,57 ± 77,56	281,10 ± 54,62	290,95 ± 48,15	0,0010	0,0102	0,0029	0,4425
Влияние на работе	293,51 ± 110,50	223,66 ± 66,25	225,00 ± 72,55	< 0,0001	< 0,0001	0,0004	0,9987
Возможности для развития	219,48 ± 50,27	195,49 ± 37,47	183,62 ± 34,90	< 0,0001	0,0011	< 0,0001	0,0959
Разнообразие в работе	81,17 ± 31,97	68,54 ± 25,92	62,50 ± 27,41	< 0,0001	0,0017	0,0002	0,2939

Окончание табл. 2

Психосоциальные факторы	$M \pm S$ (n = 77), низкий	$M \pm S$ (n = 205), норма	$M \pm S$ (n = 58), высокий	Уровень P			
				df = 2	низкий – норма	низкий – высокий	норма – высокий
Контроль рабочего времени	164,94 ± 109,29	103,05 ± 69,44	84,91 ± 78,49	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0490
Значение работы	172,40 ± 35,02	178,66 ± 26,17	182,33 ± 25,22	0,2165	0,6160	0,2792	0,6170
Предсказуемость	155,84 ± 42,32	149,76 ± 34,30	140,52 ± 28,42	0,0087	0,2696	0,0148	0,1530
Признание	213,96 ± 52,64	175,85 ± 39,40	150,86 ± 40,00	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0030
Осознание роли	265,58 ± 38,05	246,83 ± 35,04	241,81 ± 31,20	< 0,0001	0,0010	0,0012	0,6458
Конфликт ролей	69,48 ± 42,07	92,32 ± 36,95	103,02 ± 35,69	< 0,0001	0,0003	< 0,0001	0,0931
Необоснованные задания	46,10 ± 29,54	70,00 ± 22,33	72,84 ± 21,60	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,5964
Качества руководства	268,18 ± 80,67	217,44 ± 65,15	164,66 ± 61,96	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Социальная поддержка руководства	190,58 ± 62,44	148,17 ± 41,64	112,07 ± 44,73	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Социальная поддержка коллег	182,79 ± 56,52	150,49 ± 40,82	130,17 ± 46,54	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0353
Чувство коллективизма	250,00 ± 41,16	215,98 ± 35,58	205,17 ± 34,01	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,1871
Преданность работе	352,60 ± 100,62	277,32 ± 79,58	225,00 ± 87,61	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0006
Вовлеченность в работу	221,43 ± 51,89	212,56 ± 36,93	196,98 ± 40,31	0,0032	0,3179	0,0044	0,0446
Отсутствие гарантии занятости	181,49 ± 81,15	220,98 ± 50,72	234,05 ± 53,33	< 0,0001	0,0028	0,0001	0,1592
Неуверенность в условиях труда	242,53 ± 111,22	342,07 ± 82,14	346,98 ± 100,34	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,9179
Качество работы	158,12 ± 31,53	154,51 ± 27,25	141,81 ± 29,01	0,0026	0,6300	0,0125	0,0343
Удовлетворение от работы	343,18 ± 59,69	283,90 ± 61,06	242,24 ± 58,90	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Конфликты на рабочем месте	188,64 ± 106,57	280,00 ± 91,87	276,72 ± 119,56	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,9776
Горизонталь доверия	162,01 ± 63,43	142,80 ± 40,83	126,29 ± 32,92	0,0202	0,7259	0,0360	0,0718
Вертикаль доверия	256,82 ± 67,94	225,61 ± 51,54	207,33 ± 46,36	< 0,0001	0,0001	< 0,0001	0,1060
Справедливая организация труда	246,10 ± 67,26	174,27 ± 64,45	119,40 ± 56,01	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Здоровье	68,18 ± 22,45	61,59 ± 19,72	46,55 ± 18,99	< 0,0001	0,1004	< 0,0001	< 0,0001
Самооценка здоровья	8,17 ± 1,39	7,48 ± 1,53	6,24 ± 1,30	< 0,0001	0,0055	< 0,0001	< 0,0001
Проблемы со сном	90,26 ± 55,33	173,17 ± 66,14	255,60 ± 72,55	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Выгорание	118,51 ± 45,78	243,05 ± 36,93	349,57 ± 28,29	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Стресс	79,55 ± 40,50	125,61 ± 47,00	181,47 ± 38,78	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Соматический стресс	59,09 ± 46,40	113,29 ± 60,56	176,29 ± 65,80	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Когнитивный стресс	37,66 ± 46,70	84,15 ± 58,46	117,24 ± 55,84	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0010
Депрессивные симптомы	48,05 ± 56,16	103,54 ± 58,60	163,79 ± 63,38	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Самоэффективность	406,18 ± 136,01	364,04 ± 114,26	298,14 ± 96,36	< 0,0001	0,0499	< 0,0001	0,0006

Таблица 3

Межгрупповое сравнение уровней «Выгорание» и «Удовлетворенность работой» ВОП

Уровни показателя «Удовлетворение от работы» ВОП	Уровни показателя «Выгорание»			Уровень p (df = 4)
	низкий, n = 77	норма, n = 205	высокий, n = 58	
Норма	47 (61,04 %)	142 (69,27 %)	25 (43,10 %)	< 0,0001
Низкий	3 (3,90 %)	42 (20,49 %)	32 (55,17 %)	
Высокий	27 (35,06 %)	21 (10,24 %)	1 (1,72 %)	

На основании взаимосвязи между факторами «Удовлетворенность работой» и «Выгорание» (r = -0,5; p < 0,0001) был выполнен регрессионный анализ, где ведущим фактором является «Удовлетворение от работы», зависимым – «Выгорание» (рис. 2).

Показано, что среднее изменение значений показателя «Выгорание» уменьшается на 0,59 балла при увеличении значений показателя «Удовлетворение от работы», при этом регрессионная модель объясняет 24,1 % дисперсии (R^2 = 24,1; p < 0,0001).

Выявленные данные с подтверждением их достоверной связи между факторами «Выгорание» и «Удовлетворение от работы» ВОП были дополнительно использованы в многофакторном анализе для определения рангов значимости факторов, определяющих низкие уровни удовлетворенности работой ВОП (табл. 4).

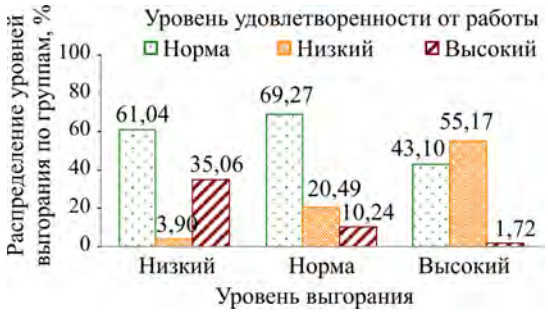


Рис. 1. Распределение уровней показателя «Удовлетворение от работы» в группах «Выгорание»

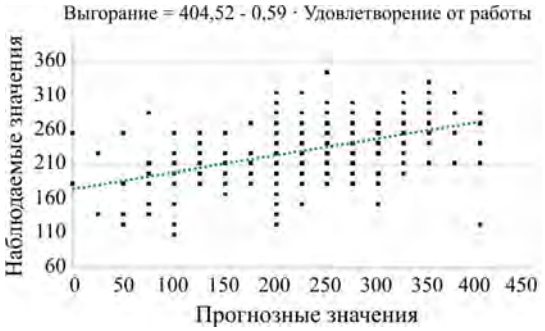


Рис. 2. Среднее изменение показателя «Выгорание» при увеличении показателя «Удовлетворение от работы»

Таблица 4

Распределение психосоциальных факторов риска низкого уровня удовлетворенности работой

Психосоциальные факторы	*RR* (95 % *CI*)	*OR* (95 % *CI*)	AuROC	*Se*, %	*Sp*, %	Уровень *p* (*df* = 1)
Выгорание ≥ 250,0	22,48 (9,41; 53,72)	56,70 (22,34; 143,87)	0,88	96,27	68,73	< 0,0001
Депрессивные симптомы ≥ 125,0	8,31 (5,04; 13,68)	20,21 (11,08; 36,88)	0,88	88,81	71,81	< 0,0001
Стресс ≥ 150,0	5,67 (3,75; 8,55)	12,73 (7,49; 21,64)	0,86	83,58	71,43	< 0,0001
Проблемы со сном ≥ 200,0	6,08 (3,91; 9,48)	13,30 (7,66; 23,10)	0,84	85,82	68,73	< 0,0001
Когнитивный стресс ≥ 100,0	5,85 (3,80; 9,01)	12,75 (7,41; 21,96)	0,83	85,07	69,11	< 0,0001
Удовлетворение от работы < 275,0	4,4 (3,11; 6,24)	9,72 (5,96; 15,85)	0,83	76,87	74,52	< 0,0001
Неуверенность в условиях труда ≥ 375,0	3,94 (2,82; 5,50)	8,26 (5,12; 13,32)	0,84	74,63	73,75	< 0,0001
Справедливая организация труда < 150,0	3,58 (2,65; 4,83)	7,85 (4,91; 12,55)	0,83	67,91	78,76	< 0,0001
Качества руководства < 200,0	3,61 (2,65; 4,92)	7,63 (4,78; 12,18)	0,78	70,15	76,45	< 0,0001
Необоснованные задания ≥ 75,0	8,81 (4,45; 17,47)	16,63 (7,81; 35,37)	0,81	94,03	51,35	< 0,0001
Эмоциональные требования ≥ 225,0	6,48 (3,71; 11,32)	12,15 (6,40; 23,07)	0,85	91,04	54,44	< 0,0001
Конфликты на рабочем месте ≥ 275,0	3,77 (2,61; 5,43)	6,99 (4,29; 11,39)	0,77	79,10	64,86	< 0,0001
Количественные требования ≥ 200,0	4,08 (2,73; 6,10)	7,43 (4,44; 12,41)	0,81	82,84	60,62	< 0,0001
Признание < 175,0	3,32 (2,40; 4,60)	6,20 (3,90; 9,87)	0,80	73,13	69,50	< 0,0001
Соматический стресс ≥ 100,0	5,63 (3,23; 9,81)	9,93 (5,23; 18,86)	0,81	91,04	49,42	< 0,0001
Конфликт ролей ≥ 100,0	5,4 (3,03; 9,64)	9,21 (4,74; 17,89)	0,78	91,79	45,17	< 0,0001
Отсутствие гарантии занятости ≥ 225,0	5,39 (2,93; 9,88)	9,01 (4,52; 17,96)	0,80	92,54	42,08	< 0,0001
Преданность работе < 250,0	2,61 (1,99; 3,43)	4,79 (3,05; 7,52)	0,76	57,46	77,99	< 0,0001
Темп работы ≥ 250,0	2,86 (2,07; 3,95)	4,84 (3,07; 7,64)	0,75	72,39	64,86	< 0,0001
Социальная поддержка руководства < 150,0	2,64 (1,99; 3,50)	4,66 (2,99; 7,29)	0,77	61,94	74,13	< 0,0001
Чувство коллективизма < 225,0	2,66 (1,94; 3,64)	4,35 (2,77; 6,83)	0,75	70,90	64,09	< 0,0001

Окончание табл. 4

Психосоциальные факторы	*RR* (95 % *CI*)	*OR* (95 % *CI*)	AuROC	*Se*, %	*Sp*, %	Уровень *p* (*df* = 1)
Контроль рабочего времени < 75,0	2,27 (1,73; 2,98)	3,72 (2,39; 5,78)	0,73	55,97	74,52	< 0,0001
Требование скрывать эмоции ≥ 300,0	2,39 (1,76; 3,25)	3,72 (2,39; 5,80)	0,73	68,66	62,93	< 0,0001
Когнитивные требования ≥ 325,0	2,62 (1,83; 3,75)	4,00 (2,48; 6,46)	0,74	78,36	52,51	< 0,0001
Социальная поддержка коллег < 150,0	2,25 (1,71; 2,98)	3,59 (2,32; 5,56)	0,73	58,96	71,43	< 0,0001
Самооценка здоровья < 8,0	2,26 (1,68; 3,04)	3,47 (2,24; 5,38)	0,67	65,67	64,48	< 0,0001
Самоэффективность < 402,0	2,25 (1,62; 3,13)	3,28 (2,08; 5,17)	0,69	73,88	53,67	< 0,0001
Вертикаль доверия < 225,0	2,01 (1,50; 2,69)	2,90 (1,88; 4,46)	0,69	63,43	62,55	< 0,0001
Здоровье < 75,0	1,87 (1,40; 2,50)	2,59 (1,68; 3,98)	0,63	63,43	59,85	< 0,0001
Качество работы < 150,0	1,83 (1,40; 2,40)	2,81 (1,67; 4,74)	0,68	29,10	87,26	< 0,0001
Возможности для развития < 200,0	1,72 (1,30; 2,27)	2,28 (1,49; 3,50)	0,67	58,96	61,39	0,0001
Влияние на работе < 225,0	1,72 (1,29; 2,28)	2,28 (1,49; 3,49)	0,68	59,70	60,62	0,0001
Осознание роли < 275,0	1,89 (1,33; 2,70)	2,51 (1,55; 4,05)	0,63	78,36	40,93	0,0001
Разнообразие в работе < 75,0	1,46 (1,11; 1,92)	1,79 (1,17; 2,72)	0,60	53,73	60,62	0,0066
Вовлеченность в работу < 225,0	1,36 (1,03; 1,79)	1,59 (1,05; 2,42)	0,59	55,97	55,60	0,0296
Предсказуемость < 150,0	1,3 (0,97; 1,72)	1,50 (0,95; 2,38)	0,62	32,09	76,06	0,0834
Значение работы ≥ 200,0	1,19 (0,90; 1,57)	1,30 (0,85; 1,98)	0,58	56,72	49,81	0,2196
Горизонталь доверия < 150,0	0,98 (0,74; 1,30)	0,97 (0,64; 1,48)	0,59	41,79	57,53	0,8971



Рис. 3. Рисковые классы в группе «низкий» уровень удовлетворенности работой ВОП

Результатами анализа достоверно определены 35 факторов и их значения, повышающие риск низкого уровня удовлетворенности работой ВОП.

На примере модели «Древо решений» показан алгоритм прогноза развития низкого уровня удовлетворенности работой ВОП в зависимости от параметров рисковых классов «Депрессивные симптомы», обусловленные показателями «Конфликтом на рабочем месте» и «Неуверенностью в условиях труда» (рис. 3).

На модели «Древо решений» показано, что при разных значениях параметров рисковых классов изменяется вероятность развития низкого уровня показателя «Удовлетворение от работы» ВОП. Так, при оценочных значениях факторов «Депрессивные симптомы» более (≥) 125,0 баллов, «Неуверенность в условиях труда» (≥) 350,0 баллов вероятность развития «неудовлетворенности работой» увеличивается до 80 %.

При снижении факторов показателя «Депрессивные симптомы» менее (<) 125,0 баллов, «Конфликты на

рабочем месте» (<) 375,0 баллов вероятность развития «Неудовлетворенности работой» снижается до 3,0 %.

Проверочные тесты качества модели «Древа решений» по рисковым классам низкого уровня удовлетворенности работой ВОП характеризуются высокой чувствительностью – 95,9 % (табл. 5).

Таблица 5

Проверочные тесты качества модели «Древо решений» по рисковым классам низкого уровня удовлетворенности работой ВОП

Показатель	Значение
Точка отсечения	24,2 %
AuROC	0,92
Чувствительность	95,9 %
Специфичность	77,4 %
Эффективность	86,6 %
Прогнозная ценность положительного результата	70,7 %
Прогнозная ценность отрицательного результата	97,0 %

На ROC-графике визуализированы проверочные тесты модели «Древо решений» низкого уровня удовлетворенности работой ВОП (рис. 4).

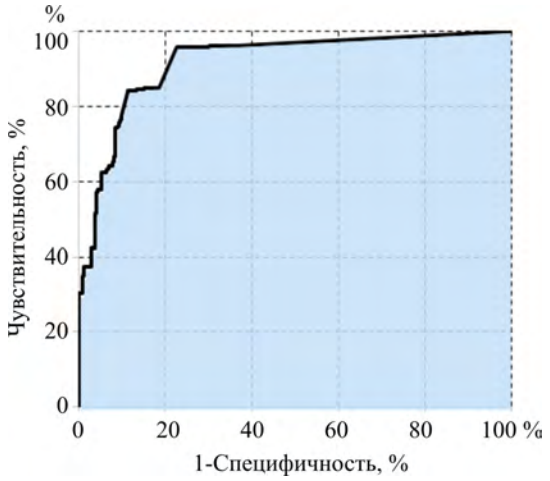


Рис. 4. ROC-график модели «Древо решений» по рассчитанным параметрам факторов низкого уровня удовлетворенности работой ВОП

Полученные данные позволили обосновать низкий уровень удовлетворенности работой у 34,1 % врачей общей практики при оказании первичной-медико-санитарной медицинской помощи населению в МО г. Москвы [16, 17]. На этом основании правомерно утверждать, что крайняя степень неудовлетворенности работой является предиктором развития профессионального выгорания.

Полученные нами данные также сопоставимы с результатами исследований, в которых эмоциональное выгорание врачей общей практики наблюдалось у 35 % ВОП, из них 37 % среднего и 14 % высокого уровней [18].

Расчет влияния вмешательства на выгорание и связанные с ним симптомы в ряде исследований основан на отдельных программах по снижению стресса [19]. Также имеются данные об эффективности психосоциальных вмешательств (например, снижение деперсонализации, более высокие личные достижения) сразу после их внедрений (g_w = 0,243, 95 % *CI* [-0,042; 0,529]) [20]. Однако полученные результаты не были достоверно значимыми (p = 0,090) для совокупной выборки, а широкий интервал прогнозирования предполагал, что будущие подобные вмешательства могут иметь противоположный (отрицательный) эффект и усилить симптомы выгорания среди врачей [21–24].

В научном сообществе и среди организаторов здравоохранения широко обсуждаются меры по повышению медико-социальной эффективности врачей путем разработок психосоциальных стратегий в управлении симптомами выгорания [20, 25, 26]. Однако состояние проблемной исследовательской области ограничено выборкой среди специализированных отраслей медицины и остается без должного методического и технологического развития управленческих решений на первой ступени контакта медицинской организации с населением. В доступной научной литературе нами не обнаружились публикации, содержащие прогнозные модели по управлению психосоциальными факторами риска, формирующие условия низкой удовлетворенности работой с последствиями профессионального выгорания ВОП при осуществлении профессиональной деятельности, что актуализирует продолжение прикладных научных исследований по данной тематике.

Предложенные алгоритмы прогноза управления рисками низкой удовлетворенности работой врачей были учтены при разработке и дальнейшей апробации организационных технологий по превенции рисков снижения удовлетворенности работой и выгорания ВОП и последовательно включали следующие этапы:

– признание проблемы низкой удовлетворенности ВОП работой и низкой удовлетворенности пациентов качеством оказанной медицинской помощи (параллельный опрос ВОП (опросник COPSOQ III shot version) и пациентов (опросник Europep));

– создание системы совещаний с ВОП, где при первой встрече с руководством МО были озвучены цели и видение стратегии развития МО; ВОП было предложено объединиться в фокус-группу и представить свой концепт-план развития отделения для обсуждения промежуточных результатов;

– определение проблемной «зоны» регулярной деятельности и пути ее корректировки;

– разработка системы KPI (Key Performance Indicators – ключевые показатели эффективности), основанной на расчете соотношения количества принятых на приеме пациентов с количеством удовлетворенных пациентов качеством медицинской помощи, а также безошибочное заполнение документации;

– внедрение CRM-системы (Customer Relationship Management – Управление взаимоотношениями

с клиентами), направленной на упрощение работы с пациентами и документооборотом;

– оборудование комнаты отдыха и организация тренингов психологической разгрузки;

– составление графика прохождения обучения врачей (повышение квалификации, соискательство на ученую степень), развитие наставничества по отношению к молодым специалистам, а также план участия в научно-практических конференциях и профессиональных конкурсах.

Кроме того, были утверждены короткие перерывы в работе (5–7 мин через каждые 1,5 ч) и запланированы выездные мероприятия.

Для обсуждения промежуточных результатов (по 40 мин) были выделены два дня в неделю.

Эффективность организационных мероприятий по 16 психосоциальным факторам удовлетворенности ВОП работой за три месяца увеличилась от 4,54 до 27,28 %, а по фактору выгорания снизилась на 24,09 % [27].

Результаты апробации, полученные нами, сопоставимы с открытыми данными международной практики управления кадровыми ресурсами организаций здравоохранения. Так, в исследовании S. Park et al. (2023) показано, что удовлетворенность врачей зависит от стратегии управления МО ($R^2 = 13{,}67$; $p < 0{,}0001$), инвестиций в образование и обучение ($R^2 = 7{,}96$, $p < 0{,}0001$) [28]. В систематическом обзоре B.A. Clough et al. [29] представленные по 23 исследованиям данные свидетельствуют об эффектах применения уникальных программ по превенции психосоциальных факторов выгорания врачей в пределах от $d = 0{,}08$ до $d = 1{,}08$. В более позднем систематическом обзоре P. Catapano et al. [30] была показана эффективность организационных технологий на индивидуальном и организационном уровнях с использованием когнитивно-психологической терапии и методов релаксации.

Таким образом, предлагаемая прогнозная модель риска снижения удовлетворенности работой и повышения профессионального выгорания врачей общей практики на примере ПМСП г. Москвы, составленная на основе подбора, анализа и оценки наиболее значимых общих и уникальных факторов условий труда, позволяет применить системный подход к сокращению психосоциальной нагрузки производственной среды на медицинский персонал за счет повышения медико-социальной эффективности деятельности медицинской организации.

Выводы. На примере модели «Древо решений» показан алгоритм управления оценочными параметрами значимой в управлении рисками низкой удовлетворенности работой врачей общей практики, зависящей от внутриорганизационных психосоциальных факторов. Показано, что факторы производственной среды в медицинских организациях г. Москвы формируют высокие оценочные баллы опроса по компонентам «Неуверенность в условиях труда», «Конфликты на рабочем месте» и «Депрессивные симптомы». На основании разработанных организационных технологий превенции критических уровней низкой удовлетворенности работой и выгорания показана управляемость внутриорганизационными условиями профессиональной деятельности, и в зависимости от частоты и силы внутренних взаимосвязей достигнуто снижение рисков до 3,0 %.

Предложенный алгоритм управления рисками позволяет учитывать наиболее значимые факторы психосоциальных условий работы и индивидуальных особенностей ВОП, определяющих снижение медико-социальной эффективности трудовых ресурсов медицинской организации.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Bianchi R., Schonfeld I.S. Examining the evidence base for burnout // Bull. World Health Organ. – 2023. – Vol. 101, № 11. – P. 743–745. DOI: 10.2471/BLT.23.289996

2. Harmonized definition of occupational burnout: A systematic review, semantic analysis, and Delphi consensus in 29 countries / I. Guseva Canu, S.C. Marca, F. Dell'Oro, Á. Balázs, E. Bergamaschi, C. Besse, R. Bianchi, J. Bislimovska [et al.] // Scand. J. Work Environ. Health. – 2021. – Vol. 47, № 2. – P. 95–107. DOI: 10.5271/sjweh.3935

3. Prevalence of burnout among GPs: a systematic review and meta-analysis / C. Karuna, V. Palmer, A. Scott, J. Gunn // Br. J. Gen. Pract. – 2022. – Vol. 72, № 718. – P. e316–e324. DOI: 10.3399/BJGP.2021.0441

4. The global prevalence of burnout among general practitioners: a systematic review and meta-analysis / X. Shen, H. Xu, J. Feng, J. Ye, Z. Lu, Y. Gan // Fam. Pract. – 2022. – Vol. 39, № 5. – P. 943–950. DOI: 10.1093/fampra/cmab180

5. Relationship between nurse burnout, patient and organizational outcomes: systematic review / J. Jun, M.M. Ojemeni, R. Kalamani, J. Tong, M.L. Crecelius // Int. J. Nurs. Stud. – 2021. – Vol. 119. – P. 103933. DOI: 10.1016/j.ijnurstu.2021.103933

6. The Lancet. Physician burnout: a global crisis // Lancet. – 2019. – Vol. 394, № 10193. – P. 93. DOI: 10.1016/S0140-6736(19)31573-9

7. Association Between Physician Burnout and Self-reported Errors: Meta-analysis / J. Owoc, M. Mańczak, M. Jabłońska, M. Tombarkiewicz, R. Olszewski // J. Patient Saf. – 2022. – Vol. 18, № 1. – P. e180–e188. DOI: 10.1097/PTS.0000000000000724

8. Burnout Among Neurosurgeons and Residents in Neurosurgery: A Systematic Review and Meta-Analysis of the Literature / I. Zaed, Y. Jaaiddane, S. Chibbaro, B. Tinterri // World Neurosurg. – 2020. – Vol. 143. – P. e529–e534. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.08.005

9. Saleh P., Shapiro C.M. Disturbed sleep and burnout: implications for long-term health // J. Psychosom. Res. – 2008. – Vol. 65, № 1. – P. 1–3. DOI: 10.1016/j.jpsychores.2008.05.028

10. Azzopardi-Muscat N., Zapata T., Kluge H. Moving from health workforce crisis to health workforce success: the time to act is now // Lancet Reg. Health Eur. – 2023. – Vol. 35. – P. 100765. DOI: 10.1016/j.lanepe.2023.100765

11. Global prevalence of burnout symptoms among nurses: a systematic review and meta-analysis / T. Woo, R. Ho, A. Tang, W. Tam // J. Psychiatr. Res. – 2020. – Vol. 123. – P. 9–20. DOI: 10.1016/j.jpsychires.2019.12.015

12. Systematic review of burnout among healthcare providers in sub-Saharan Africa / B.W. Dubale, L.E. Friedman, Z. Chemali, J.W. Denninger, D.H. Mehta, A. Alem, G.L. Fricchione, M.L. Dossett, B. Gelaye // BMC Public Health. – 2019. – Vol. 19, № 1. – P. 1247. DOI: 10.1186/s12889-019-7566-7

13. A survey of burnout and professional satisfaction among United States neurointerventionalists / K.M. Fargen, A.S. Arthur, T. Leslie-Mazwi, R.M. Garner, C.A. Aschenbrenner, S.Q. Wolfe, S.A. Ansari, G. Dabus [et al.] // J. Neurointerv. Surg. – 2019. – Vol. 11, № 11. – P. 1100–1104. DOI: 10.1136/neurintsurg-2019-014833

14. Relationship of grit and resilience to burnout among U.S. neurosurgery residents / H.J. Shakir, J.M. Cappuzzo, H. Shallwani, A. Kwasnicki, C. Bullis, J. Wang, R.M. Hess, E.I. Levy // World Neurosurg. – 2020. – Vol. 134. – P. e224–e236. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.10.043

15. Thielmann B., Schwarze R., Böckelmann I. A Systematic Review of Associations and Predictors for Job Satisfaction and Work Engagement in Prehospital Emergency Medical Services – Challenges for the Future // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2023. – Vol. 20, № 5. – P. 4578. DOI: 10.3390/ijerph20054578

16. Кузнецова М.А., Зудин А.Б., Горбачева Н.А. Анализ последствий: оценка факторов психосоциального риска выгорания врачей общей практики как предиктора неудовлетворенности пациентов медицинской помощью в постпандемийном периоде // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. – 2024. – Т. 32, № 9. – С. 83–90. DOI: 10.35627/2219-5238/2024-32-9-83-90

17. Изучение факторов, оказывающих влияние на психосоциальные и профессиональные характеристики врачей общей практики (семейных врачей): валидация международного опросника COPSOQ III (Long version) / М.А. Кузнецова, Т.П. Васильева, А.Б. Зудин, О.А. Груздева, К.Ю. Кузнецова // Здравоохранение Российской Федерации. – 2024. – Т. 68, № 4. – С. 315–322. DOI: 10.47470/0044-197X-2024-68-4- 315-322

18. Эмоциональное выгорание у врачей общей практики / К.Е. Еренжан, М.М. Асуханова, Г.С. Дильмагамбетова, З.Б. Молдашева, А.С. Тлеуова // West Kazakhstan Medical Journal. – 2021. – № 2 (63). – С. 117–122. DOI: 10.24412/2707-6180-2021- 63-117-122

19. Developing a mindfulness skills-based training program for resident physicians / V. Minichiello, S. Hayer, B. Gillespie, M. Goss, B. Barrett // Fam. Med. – 2020. – Vol. 52, № 1. – P. 48–52. DOI: 10.22454/FamMed.2020.461348

20. Prentice S., Patel D.N., Dorstyn D.S. Wellbeing interventions in family medicine and general practice trainees: a preliminary meta-analysis // Educ. Prim. Care. – 2025. – Vol. 36, № 3. – P. 82–93. DOI: 10.1080/14739879.2025.2469494

21. Nathan J., McCray L., Feldman N. The text effect: stress management and resiliency training pilot for resident physicians // Fam. Med. – 2021. – Vol. 53, № 2. – P. 139–144. DOI: 10.22454/FamMed.2021.847102

22. Halista C.E., Dalton H.A., Thornton J.A. Structured curricular change fails to combat resident burnout // Mil. Med. – 2024. – Vol. 189, № 1–2. – P. 370–373. DOI: 10.1093/milmed/usac188

23. Johnson E., Roth E. Improving physician wellness through electronic health record education // Int. J. Psychiatry Med. – 2021. – Vol. 56, № 5. – P. 327–333. DOI: 10.1177/00912174211034633

24. Feasibility, acceptability and effect of the mindful practice curriculum in postgraduate training of general practitioners / M. Villarreal, P. Hanson, A. Clarke, M. Khan, J. Dale // BMC Med. Educ. – 2021. – Vol. 21, № 1. – P. 327. DOI: 10.1186/s12909-021-02747-z

25. Хальфин Р.А., Смольникова П.С., Столкова А.С. Профессиональное выгорание медицинских работников: актуальный вопрос управления системой здравоохранения // Национальное здравоохранение. – 2023. – Т. 4, № 2. – С. 40–46. DOI: 10.47093/2713-069X.2023.4.2.40-46

26. What is the volume, quality and characteristics of evidence relating to the effectiveness and cost-effectiveness of multi-disciplinary occupational health interventions aiming to improve work-related outcomes for employed adults? An evidence and gap map of systematic reviews / E. Shaw, M. Nunns, S.G. Spicer, H. Lawal, S. Briscoe, G.J. Melendez-Torres, R. Garside, K. Liabo, J. Thompson Coon // Campbell Syst. Rev. – 2024. – Vol. 20, № 2. – P. e1412. DOI: 10.1002/cl2.1412

27. Стратегический выбор организационных технологий превенции выгорания врачей общей практики в системе пациент-ориентированной медицины / А.Б. Зудин, М.А. Кузнецова, Т.П. Васильева, С.В. Тырановец, К.Ю. Кузнецова // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. – 2024. – Т. 32, № 6. – С. 1234–1242. DOI: 10.32687/0869-866X-2024-32-6-1234-1242

28. Strategic management and organizational culture of medical device companies in relation to corporate performance / S. Park, H.-K. Kim, H.-J. Lee, M. Choi, M. Lee, M. Jakovljevic // J. Med. Econ. – 2023. – Vol. 26, № 1. – P. 781–792. DOI: 10.1080/13696998.2023.2224168

29. Psychosocial interventions for managing occupational stress and burnout among medical doctors: a systematic review / B.A. Clough, S. March, R.J. Chan, L.M. Casey, R. Phillips, M.J. Ireland // Syst. Rev. – 2017. – Vol. 6, № 1. – P. 144. DOI: 10.1186/s13643-017-0526-3

30. Organizational and Individual Interventions for Managing Work-Related Stress in Healthcare Professionals: A Systematic Review / P. Catapano, S. Cipolla, G. Sampogna, F. Perris, M. Luciano, F. Catapano, A. Fiorillo // Medicina (Kaunas). – 2023. – Vol. 59, № 10. – P. 1866. DOI: 10.3390/medicina59101866

Зудин А.Б., Кузнецова М.А., Васильева Т.П. Управление риском низкой удовлетворенности работой и профессионального выгорания врачей общей практики // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 2. – С. 155–165. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.13

UDC 614.2
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.13.eng

Read online

Research article

MANAGING THE RISK OF LOW JOB SATISFACTION AND PROFESSIONAL BURNOUT OF GENERAL PRACTITIONERS

A.B. Zudin, M.A. Kuznetsova, T.P. Vasilyeva

N.A. Semashko National Research Institute of Public Health, 12 Vorontsovo Pole St., build. 1, Moscow, 105064, Russian Federation

Increased work requirements accompanied by a long period of continuous exposure are the most common predictors of burnout syndrome among healthcare workers. The great variability of Russian and foreign data on prevalence of burnout among healthcare workers indicates some unaccounted factors determining different levels of the studied phenomenon as well as unresolved evaluation and technological approaches to its early prevention within healthcare personnel management.

The aim of the study was to create a model for predicting and managing the risks of occupational burnout among general practitioners. A survey was conducted among general practitioners (n = 340) employed at healthcare institutions in Moscow in the period from 2022 to 2023. The survey relied on using the Russian version of the international psychosocial questionnaire COPSOQ III (Long version) adapted for healthcare workers. Burnout levels in doctors with low job satisfaction were determined with reliability $p \leq 0.05$ by the Kruskal – Wallis test. Prediction was calculated by using linear regression analysis; models of qualitative target variables were calculated using the Decision Tree method. Relative risks and odds ratio (95 % CI) were calculated as a quantitative measure of effects.

Statistically significant differences per 38 psychosocial factors were confirmed at $p < 0.0001$. In a representative sample of doctors with low job satisfaction, those with the high level of burnout accounted for 1.72 %; 'Norm', 43.10 %; 'Low', 55.18 %. On the example of the Decision Tree model, the study described an algorithm for managing evaluation parameters of low job satisfaction, which was significant for managing risks of occupational burnout in general practitioners and depended on intra-organizational psychosocial factors 'Uncertainty over Working Conditions', 'Work Life Conflicts' and 'Depressive symptoms' and contributed to an increase up to 80 % or decrease down to 3.0 % depending on their impact in an occupational environment.

The study findings substantiate the fact that an increase in medical and social effectiveness of healthcare workers can be based on employing developed organizational technologies for preventing critical levels of low job satisfaction and occupational burnout in general practitioners as well as declining quality of rendered healthcare services. The risk management algorithm offers to consider levels of job dissatisfaction, occupational burnout and the factors with the greatest influence of psychosocial working conditions and individual traits of general practitioners.

Keywords: *burnout, job satisfaction, psychosocial risk factors, general practitioners, prognosis, risk management models, human resources, evaluation prevention technologies.*

References

1. Bianchi R., Schonfeld I.S. Examining the evidence base for burnout. *Bull. World Health Organ.*, 2023, vol. 101, no. 11, pp. 743–745. DOI: 10.2471/BLT.23.289996
2. Guseva Canu I., Marca S.C., Dell'Oro F., Balázs Á., Bergamaschi E., Besse C., Bianchi R., Bislimovska J. [et al.]. Harmonized definition of occupational burnout: A systematic review, semantic analysis, and Delphi consensus in 29 countries. *Scand. J. Work Environ. Health.*, 2021, vol. 47, no. 2, pp. 95–107. DOI: 10.5271/sjweh.3935
3. Karuna C., Palmer V., Scott A., Gunn J. Prevalence of burnout among GPs: a systematic review and meta-analysis. *Br. J. Gen. Pract.*, 2022, vol. 72, no. 718, pp. e316–e324. DOI: 10.3399/BJGP.2021.0441
4. Shen X., Xu H., Feng J., Ye J., Lu Z., Gan Y. The global prevalence of burnout among general practitioners: a systematic review and meta-analysis. *Fam. Pract.*, 2022, vol. 39, no. 5, pp. 943–950. DOI: 10.1093/fampra/cmab180
5. Jun J., Ojemeni M.M., Kalamani R., Tong J., Crecelius M.L. Relationship between nurse burnout, patient and organizational outcomes: systematic review. *Int. J. Nurs. Stud.*, 2021, vol. 119, pp. 103933. DOI: 10.1016/j.ijnurstu.2021.103933
6. The Lancet. Physician burnout: a global crisis. *Lancet*, 2019, vol. 394, pp. 93. DOI: 10.1016/S0140-6736(19)31573-9
7. Owoc J., Mańczak M., Jabłońska M., Tombarkiewicz M., Olszewski R. Association Between Physician Burnout and Self-reported Errors: Meta-analysis. *J. Patient Saf.*, 2022, vol. 18, no. 1, pp. e180–e188. DOI: 10.1097/PTS.0000000000000724

© Zudin A.B., Kuznetsova M.A., Vasilyeva T.P., 2025

Alexander B. Zudin – Doctor of Medical Sciences, director (e-mail: info@nriph.ru; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6966-5559).

Maria A. Kuznetsova – Junior Researcher (e-mail: mascha.kuznetsova@yandex.ru; tel.: +7 (926) 878-06-67; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8243-5902).

Tatyana P. Vasilyeva – Doctor of Medical Sciences, Professor, Chief Researcher **(**e-mail: vasileva_tp@mail.ru; ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4831-1783).

8. Zaed I., Jaaiddane Y., Chibbaro S., Tinterri B. Burnout Among Neurosurgeons and Residents in Neurosurgery: A Systematic Review and Meta-Analysis of the Literature. *World Neurosurg*., 2020, vol. 143, pp. e529–e534. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.08.005

9. Saleh P., Shapiro C.M. Disturbed sleep and burnout: implications for long-term health. *J. Psychosom. Res*., 2008, vol. 65, no. 1, pp. 1–3. DOI: 10.1016/j.jpsychores.2008.05.028

10. Azzopardi-Muscat N., Zapata T., Kluge H. Moving from health workforce crisis to health workforce success: the time to act is now. *Lancet Reg. Health Eur*., 2023, vol. 35, pp. 100765. DOI: 10.1016/j.lanepe.2023.100765

11. Woo T., Ho R., Tang A., Tam W. Global prevalence of burnout symptoms among nurses: a systematic review and meta-analysis. *J. Psychiatr. Res*., 2020, vol. 123, pp. 9–20. DOI: 10.1016/j.jpsychires.2019.12.015

12. Dubale B.W., Friedman L.E., Chemali Z., Denninger J.W., Mehta D.H., Alem A., Fricchione G.L., Dossett M.L., Gelaye B. Systematic review of burnout among healthcare providers in sub-Saharan Africa. *BMC Public Health*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 1247. DOI: 10.1186/s12889-019-7566-7

13. Fargen K.M., Arthur A.S., Leslie-Mazwi T., Garner R.M., Aschenbrenner C.A., Wolfe S.Q., Ansari S.A., Dabus G. [et al.]. A survey of burnout and professional satisfaction among United States neurointerventionalists. *J. Neurointerv Surg*., 2019, vol. 11, no. 11, pp. 1100–1104. DOI: 10.1136/neurintsurg-2019-014833

14. Shakir H.J., Cappuzzo J.M., Shallwani H., Kwasnicki A., Bullis C., Wang J., Hess R.M., Levy E.I. Relationship of grit and resilience to burnout among U.S. neurosurgery residents. *World Neurosurg*., 2020, vol. 134, pp. e224–e236. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.10.043

15. Thielmann B., Schwarze R., Böckelmann I. A Systematic Review of Associations and Predictors for Job Satisfaction and Work Engagement in Prehospital Emergency Medical Services – Challenges for the Future. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2023, vol. 20, no. 5, pp. 4578. DOI: 10.3390/ijerph20054578

16. Kuznetsova M.A., Zudin A.B., Gorbacheva N.A. Consequence analysis: Assessment of psychosocial risk factors for burnout in general practitioners as a predictor of patient dissatisfaction with health care in the post-pandemic era. *ZNiSO*, 2024, vol. 32, no. 9, pp. 83–90. DOI: 10.35627/2219-5238/2024-32-9-83-90 (in Russian).

17. Kuznetsova M.A., Vasilyeva T.P., Zudin A.B., Gruzdeva O.A., Kuznetsova K.Yu. Study of factors influencing psychosocial and professional characteristics of general practitioners (family doctors): validation of the international questionnaire COPSOQ III (Long version). *Zdravookhranenie Rossiiskoi Federatsii*, 2024, vol. 68, no. 4, pp. 315–322. DOI: 10.47470/0044-197X-2024-68-4- 315-322 (in Russian).

18. Yerenzhan K.E., Assukhanova M.M., Dilmagambetova G.S., Moldasheva Z.B., Tleuova A.S. General practitioners' emotional burn-out. *West Kazakhstan Medical Journal*, 2021, no. 2 (63), pp. 117–122. DOI: 10.24412/2707-6180-2021- 63-117-122 (in Russian).

19. Minichiello V., Hayer S., Gillespie B., Goss M., Barrett B. Developing a mindfulness skills-based training program for resident physicians. *Fam. Med*., 2020, vol. 52, no. 1, pp. 48–52. DOI: 10.22454/FamMed.2020.461348

20. Prentice S., Patel D.N., Dorstyn D.S. Wellbeing interventions in family medicine and general practice trainees: a preliminary meta-analysis. *Educ. Prim. Care*, 2025, vol. 36, no. 3, pp. 82–93. DOI: 10.1080/14739879.2025.2469494

21. Nathan J., McCray L., Feldman N. The text effect: stress management and resiliency training pilot for resident physicians. *Fam. Med*., 2021, vol. 53, no. 2, pp. 139–144. DOI: 10.22454/FamMed.2021.847102

22. Halista C.E., Dalton H.A., Thornton J.A. Structured curricular change fails to combat resident burnout. *Mil. Med.*, 2024, vol. 189, no. 1–2, pp. 370–373. DOI: 10.1093/milmed/usac188

23. Johnson E., Roth E. Improving physician wellness through electronic health record education. *Int. J. Psychiatry Med.*, 2021, vol. 56, no. 5, pp. 327–333. DOI: 10.1177/00912174211034633

24. Villarreal M., Hanson P., Clarke A., Khan M., Dale J. Feasibility, acceptability and effect of the mindful practice curriculum in postgraduate training of general practitioners. *BMC Med. Educ*., 2021, vol. 21, no. 1, pp. 327. DOI: 10.1186/s12909-021-02747-z

25. Khalfin R.A., Smolnikova P.S., Stolkova A.S. Burnout among health care workers: a pressing problem for health care management. *Natsional'noe zdravookhranenie*, 2023, vol. 4, no. 2, pp. 40–46. DOI: 10.47093/2713-069X.2023.4.2.40-46 (in Russian).

26. Shaw E., Nunns M., Spicer S.G., Lawal H., Briscoe S., Melendez-Torres G.J., Garside R., Liabo K., Thompson Coon J. What is the volume, quality and characteristics of evidence relating to the effectiveness and cost-effectiveness of multi-disciplinary occupational health interventions aiming to improve work-related outcomes for employed adults? An evidence and gap map of systematic reviews. *Campbell Syst. Rev*., 2024, vol. 20, no. 2, pp. e1412. DOI: 10.1002/cl2.1412

27. Zudin A.B., Kuznetsova M.A., Vasilyeva T.P., Tyranovets S.V., Kuznetsova K.Yu. The strategic choice of organizational technologies preventing burning out of general practitioners in the system of patient-oriented medicine. *Problemy sotsialnoi gigieny, zdravookhraneniya i istorii meditsiny*, 2024, vol. 32, no. 6, pp. 1234–1242. DOI: 10.32687/0869-866X-2024-32-6-1234-1242 (in Russian).

28. Park S., Kim H.-K., Lee H.-J., Choi M., Lee M., Jakovljevic M. Strategic management and organizational culture of medical device companies in relation to corporate performance. *J. Med. Econ*., 2023, vol. 26, no. 1, pp. 781–792. DOI: 10.1080/13696998.2023.2224168

29. Clough B.A., March S., Chan R.J., Casey L.M., Phillips R., Ireland M.J. Psychosocial interventions for managing occupational stress and burnout among medical doctors: a systematic review. *Syst. Rev*., 2017, vol. 6, no. 1, pp. 144. DOI: 10.1186/s13643-017-0526-3

30. Catapano P., Cipolla S., Sampogna G., Perris F., Luciano M., Catapano F., Fiorillo A. Organizational and Individual Interventions for Managing Work-Related Stress in Healthcare Professionals: A Systematic Review. *Medicina (Kaunas)*, 2023, vol. 59, no. 10, pp. 1866. DOI: 10.3390/medicina59101866

Zudin A.B., Kuznetsova M.A., Vasilyeva T.P. Managing the risk of low job satisfaction and professional burnout of general practitioners. Health Risk Analysis, 2025, no. 2, pp. 155–165. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.13.eng

Получена: 10.04.2025
Одобрена: 09.06.2025
Принята к публикации: 26.06.2025

УДК 519.254: 519.257
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.14

Читать онлайн

Научная статья

МЕТОД RANDOM FOREST В ЗАДАЧАХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА СЛЮНЫ ПРИ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Г.В. Жукова[1], П.А. Мартыщук[1], Е.Р. Афер[1], А.Н. Шуваев[1], Н.А. Розанова[2], Д.В. Сергеев[2], В.А. Кратасюк[1, 3]

[1]Сибирский федеральный университет, Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, Свободный пр., 79
[2]Научный центр неврологии, Российская Федерация, 125367, г. Москва, Волоколамское шоссе, 80
[3]Институт биофизики СО РАН, обособленное подразделение ФНЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 50

Развитие направления персонифицированной медицины и биотехнологии напрямую связано с получением данных, в значительной степени зависящих от индивидуальных характеристик исследуемых. При этом используемые в традиционной медицине допустимые интервалы исследуемых параметров не всегда позволяют адекватно охарактеризовать состояние пациента. Возникает необходимость поиска таких методов обработки результатов, которые позволяют учитывать разные индивидуальные особенности организма испытуемых и образа его жизни.

Определены возможности применения анализа биомедицинских данных Random Forest для корректной интерпретации результатов персонифицированных диагностических тестов на примере биолюминесцентного тестирования, позволяющего оценить влияние разных характеристик испытуемых и условий их жизни. Метод позволяет минимизировать риски неверного диагноза и корректировать схему мониторинга исследуемых.

В данной работе используются результаты диагностики трудовой нагрузки работников железнодорожного транспорта, полученные биолюминесцентным методом. Оценку состояния организма проводят, изучая влияние слюны испытуемых на интенсивность свечения биферментной системы: НАДН: ФМН-оксидоредуктаза + люцифераза. Такой анализ является интегральным, реагирует на множество факторов, каждый из которых потенциально может повлиять на результат. Оценку эффективности разных методов обработки данных проводили на примере группы диспетчеров Красноярского филиала АО «РЖД». Для анализа были использованы как статистические методы, так и алгоритм машинного обучения Random Forest.

В результате было показано, что для оценки значимости некоторых биохимических показателей слюны для прогнозирования состояния организма работников железнодорожного транспорта целесообразно использовать метод Random Forest, который позволяет определить наиболее значимые факторы и построить графики частичного влияния факторов на целевую переменную. Данное исследование позволяет оптимизировать систему диагностики организма человека при использовании интегрального биолюминесцентного анализа. Метод Random Forest может быть составной частью персонифицированного биолюминесцентного биосенсора для оценки влияния стрессовых и трудовых нагрузок на организм человека.

Ключевые слова: *персонифицированная диагностика, машинное обучение, анализ данных, многофакторный анализ, слюна, биолюминесценция, биосенсор, сигнальные системы.*

© Жукова Г.В., Мартыщук П.А., Афер Е.Р., Шуваев А.Н., Розанова Н.А., Сергеев Д.В., Кратасюк В.А., 2025

Жукова Галина Викторовна – аспирант Института фундаментальной биологии и биотехнологии, младший научный сотрудник лаборатории биолюминесцентных биотехнологий (e-mail: gvivanova@sfu-kras.ru; тел.: 8 (913) 047-88-37; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8646-1224).

Мартыщук Полина Александровна – студент Института фундаментальной биологии и биотехнологии (e-mail: p.martishuk@yandex.ru; тел.: 8 (904) 896-97-34).

Афер Егор Романович – студент Института фундаментальной биологии и биотехнологии (e-mail: egorafer@yandex.ru; тел.: 8 (902) 957-64-89).

Шуваев Андрей Николаевич – кандидат физико-математических наук, заведующий базовой кафедрой медико-биологических систем и комплексов Института фундаментальной биологии и биотехнологии (e-mail: ashuvaev@sfu-kras.ru; тел.: 8 (950) 997-77-92; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3887-1413).

Розанова Наталья Александровна – лаборант-исследователь, аспирант лаборатории нейробиологии и тканевой инженерии Института мозга (e-mail: nataliarozanovaa@gmail.com; тел.: 8 (968) 030-47-28; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9619-4679).

Сергеев Дмитрий Владимирович – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, врач-невролог (e-mail: sergeev@neurology.ru; тел.: 8 (926) 860-08-97; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9130-1292).

Кратасюк Валентина Александровна – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой биофизики Института фундаментальной биологии и биотехнологии; ведущий научный сотрудник (e-mail: valkrat@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6764-5231).

В настоящее время персонифицированный подход становится все более популярным в медицине, в связи с чем увеличивается объем полученных при диагностике индивидуальных данных, на которые влияет множество факторов: возраст, образ жизни, условия труда, стрессовые состояния. Допустимые интервалы исследуемых параметров часто не позволяют адекватно охарактеризовать состояние пациента и анализировать риски здоровью с учетом его индивидуальных особенностей. Перспективной биологической жидкостью, которая может использоваться для решения данной проблемы, является слюна. Ее применение в диагностических целях имеет ряд преимуществ: неинвазивный метод сбора, зависимость состава и количества слюны от патологических и физиологических состояний организма [1–3]. Эти проблемы не решены для нового биолюминесцентного неинвазивного биотеста, основанного на оценке влияния слюны на биферментную систему: NAD (P) H: FMN-оксидоредуктаза + люцифераза и зависимости состава слюны от патологических и физиологических состояний организма [4]. Множество факторов влияют на результаты анализа [5], что делает необходимым найти метод для оценки их вклада в биомедицинские данные с учетом разнообразия персонифицированных характеристик испытуемых, найти возможность усреднения данных, выделения критериев нормального состояния и отклонения от нормы.

Существует три основных группы анализа биомедицинских данных: статистические методы, кластеризация и машинное обучение[1] [6–11]. При этом статистическая компонента может быть достаточно сильно задействована в алгоритмах машинного обучения. Статистический анализ обычно оперирует небольшими по объему наборами данных и направлен на понимание взаимосвязей между переменными и проверку гипотез. Машинное обучение более активно применяется в биотехнологиях, так как позволяет автоматизировать различные процессы, обрабатывать более крупные и сложные наборы данных, фокусируется на точности прогнозирования и классификации в задачах без явной переменной-результата, что дает возможность обрабатывать самые разные типы и структуры данных без строгих предположений [6]. Статистический анализ начинается с гипотезы о главном факторе, характеризующем состояние организма, и использует результаты для ее проверки. При этом анализ опирается на заранее определенные модели о распределении данных (например, нормальном распределении)[2].

Для анализа слюны корреляционный анализ принято считать базовым статистическим методом [7]. В частности, вычисление корреляции Спирмена позволяет оценить силу и направление связи между двумя ранжированными переменными и понять, насколько хорошо эта связь описывается с помощью монотонной функции. Для этого не нужны предположения о характере распределений признаков из-за непараметричности этого теста. Также часто при анализе слюны используется непараметрический тест Манна – Уитни для выявления достоверных статистических различий между двумя независимыми группами по уровню какого-либо признака [7, 10], даже для малых выборок[2]. Данные методы позволяют найти взаимосвязи между параметрами и провести первичный анализ набора данных. Однако опыт применения базовых статистических методов не всегда позволяет выявить ключевые факторы, влияющие на целевой показатель слюны.

Другим решением проблемы недостаточности арсенала статистического анализа в интерпретации данных по слюне могут быть алгоритмы машинного обучения, которые используются для обнаружения заболеваний различных систем организма [12–18]. Исходя из специфики задачи (поиск значимых факторов, влияющих на индикаторные показатели слюны), можно выбрать алгоритмы, находящие закономерности, по ранее размеченным наборам данных. Метки данных дают модели обратную связь, позволяя скорректировать результат и повысить точность прогноза. Для анализа данных слюны может быть использовано семейство алгоритмов, основанных на построении деревьев решений, таких как CART, Random Forest и бустинги [13, 15, 16, 19]. Метод Random Forest является одним из самых популярных методов для решения задач неглубокого машинного обучения[3]. Помимо определения класса объекта и нахождения точного значения целевой переменной, алгоритм Random Forest позволяет предсказывать значимость каждого параметра модели для принятия решения, учитывая его уровень относительно вершины дерева, частоту попадания этого параметра в решающий узел, количество объектов, правильно классифицированных с его помощью. Наиболее значимыми являются параметры, находящиеся ближе к вершине дерева [20]. Алгоритм случайного леса создает график частичной зависимости (PDB) для каждого параметра модели. Для рег-

[1] Макарова Н.В. Статистический анализ медико-биологических данных с использованием пакетов статистических программ Statistica, SPSS, NPSS, SYSTAT: методическое пособие / под ред. проф. С.С. Алексанина. – СПб.: Полиграфический центр Санкт-Петербургского ун-та ГПС МЧС России, 2012. – 179 с.; Шорохова И.С., Кисляк Н.В., Мариев О.С. Статистические методы анализа: учебное пособие. – 2-е изд. – М.: ФЛИНТА, 2017. – 300 с.

[2] Макарова Н.В. Указ. соч.

[3] Жерон О. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn и Tensorflow: концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных систем / пер. с англ. Ю.Н. Артеменко. – СПб.: Диалектика-Вильямс, 2020. – 1040 с.

рессионной задачи график показывает усредненные отношения между признаком и целевым значением. Для классификации строится усредненная зависимость между вероятностью верного определения класса объекта и признаком, используемым при построении модели[4].

Цель исследования – понять, можно ли метод анализа данных Random Forest использовать для корректной интерпретации результатов персонифицированных данных в биолюминесцентном биосенсоре для оценки влияния стрессовых и трудовых нагрузок на организм человека.

Материалы и методы. Для оценки эффективности программы обработки были использованы результаты диагностики, полученные при исследовании группы диспетчеров Красноярского филиала ОАО «РЖД» ($n = 43$). Исследования проводились ежедневно в течение месяца согласно рабочему графику в 2022 и 2023 гг. Для расширения выборки был применен ресэмплинг, при этом контроль за переобучением осуществлялся путем разделения на обучающую и тестовую выборки. Исследуемые параметры были получены при анализе слюны, собранной два раза в сутки: до и после смены. Были оценены такие показатели слюны, как pH, концентрация лактата, остаточное свечение биферментной системы светящихся бактерий: NAD (P) H: FMN-оксидоредуктаза + люцифераза (ЛИ, %) [21], а также биохимические показатели крови и другие результаты профосмотра сотрудников, выполненного на базе ЧУЗ «Клиническая больница “РЖД-медицина”», данные самоанкетирования, включающие субъективную оценку стресса и работоспособности до и после смены, информацию о режиме дня, потреблении пищи, лекарственных средств, энергетических напитков и табака.

Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики и одобрены локальным этическим комитетом Сибирского федерального университета (г. Красноярск), протокол № 5 от 11.11.2019).

Каждый участник исследования предоставил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Машинное обучение на задачах классификации и регрессии методом Random Forest выполнено в Python 3 при помощи библиотеки scikit-learning. Важность факторов в этой библиотеке вычисляется по улучшению чистоты коэффициента Джини после разделения по каждому из этих факторов при классификации либо по уменьшению дисперсии прогноза по данному фактору для регрессии. В работе использовалась возможность библиотеки scikit-learning визуализации частичного влияния каждого фактора на целевую переменную. Статистический анализ выполнен в программе R с использованием базовых библиотек и библиотеки ggplot2. Статистически значимым принималось отличие при p-значениях, меньше либо равных 0,05.

Результаты и их обсуждение. Размер базы биомедицинских данных после предобработки составил 310 строк. Для увеличения базы данных был проведен ресэмплинг, позволивший увеличить количество строк в 4 раза путем формирования новых строк случайным выбором из имеющихся. Перед работой данные разделили на тренировочную выборку (80 % от исходной выборки) и тестовую выборку (20 % исходной выборки). Для дальнейшего анализа были использованы переменные, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Факторы, использованные для проверки эффективности программы обработки

Название поля	Размерность	Диапазон
Концентрация лактата в слюне	ммоль/л	0,2–80,7
Уровень глюкозы в крови	ммоль/л	3,2–9,8
Уровень холестерина общий	моль/л	3,4–6,8
pH	pH	3–8
Время забора пробы	До смены (утром) – 1; после смены (вечер) – 0	0,1
Уровень стресса (отношение к работе)	Очень волнуюсь – 3; волнуюсь – 2; спокоен – 1; нет волнения – 0	0–3
Интервал между курением и забором пробы	Минуты	0–120
Пол	Женский – 1; мужской – 0	0,1
Курение	Курил – 1; не курил – 0	0,1
Время суток (утро / вечер)	Утро – 1; вечер – 0	0,1
ЛИ (остаточное свечение)	%	1,08–142,50

В качестве предобработки для выявления наиболее перспективных факторов для включения в машинное обучение методом статистической обработки были оценены коэффициенты корреляции между целевыми параметрами из табл. 1.

Корреляционный анализ показал значимые отрицательные связи целевой переменной ЛИ с отношением к работе испытуемых по шкале от 1 до 5 и временем, прошедшим после курения, для женской группы испытуемых. Выявлены значимые положительные связи целевой переменной с уровнем глюкозы в крови (в женской группе) и с уровнем холестерина (в мужской группе). Корреляционные коэффициенты, представленные в табл. 2, значимы на p-уровне (< 0,05).

[4] Jain A., Fandango A., Kapoor A. Tensorflow Machine Learning Projects. – Packt Publishing, 2018. – 322 p.

Таблица 2

Корреляция факторов с целевой переменной (ЛИ)

Факторы	Коэффициент корреляции
Отношение к работе (женщины)	-0,618
Время между курением и забором пробы (женщины)	-0,699
Глюкоза, ммоль/л (женщины)	0,446
Холестерин общий, моль/л (мужчины)	0,671

В качестве перспективных для анализа алгоритмов был выбран ансамблевый алгоритм машинного обучения, основанный на построении деревьев решений, метод случайного леса. Решали два типа задач: классификационная (с помощью Random Forest Classifier библиотеки scikit-learn), в которой алгоритм прогнозировал принадлежность к группам высокого, низкого или среднего значения ЛИ, и регрессионная (с помощью Random Forest Regressor библиотеки scikit-learn) с прогнозом точного значения ЛИ по задаваемым факторам. Были выявлены наиболее значимые факторы и построены графики частичной зависимости. В обоих случаях определялись точность прогноза, значимость каждого из факторов по влиянию на ЛИ (рис. 1), а также анализировалось частичное влияние фактора на ЛИ в зависимости от уровня фактора. Важность факторов и стандартное отклонение вычислялись по результатам построения 2000 деревьев в каждой задаче и определялись по индексу Джини на основании снижения неопределенности при разбиении узлов: чем выше в дереве фактор, тем более значимым он считался.

Проверка гипотезы значимости отличия от нуля каждого из факторов тестом Стьюдента с последующей поправкой Бонферрони на множественное сравнение показала достоверное отличие каждого из признаков. При этом наиболее важными по влиянию на ЛИ оказались как при классификации, так и при регрессии три фактора: концентрация лактата, а также уровни глюкозы и pH. Дополнительно к важным факторам при классификации можно отнести уровень холестерина в крови.

Стоит отметить разную важность фактора курения. Если сам факт, курит ли исследуемый человек или нет, обладает практически нулевой важностью, то временной интервал между курением и забором пробы достоверно выше для обеих задач (p-значения – 1,18E-07 для классификации и 1,26E-06 для регрессии). Такое расхождение можно объяснить быстрым нивелированием эффекта курения у слюны.

Среднее значение метрик обучения составило: MAE = 28,73; MS = 880,99: R^2 = 0,175 в случае регрессии. При решении классификационной задачи точность прогноза составила 96 %. Высокая точность классификации при низком R^2 обусловлена различной природой задач регрессии и классификации. В классификации модель распознает классы по нелинейным комбинациям признаков, тогда как регрессионная модель страдает от высокой дисперсии отклика.

Частичное влияние также было оценено для двух типов задач (рис. 2, 3).

Граничным уровнем глюкозы, при котором она перестает оказывать воздействие на люциферазный индекс, является уровень выше 6 ммоль/л (см. рис. 2). Наибольшая вероятность получить значение ЛИ, близкое к верхней границе предполагаемой нормы, наблюдается при низком уровне глюкозы в крови. Для pH уровень меньше 5 практически не оказывает влияние на уровень целевой переменной. Однако при увеличении pH влияние на ЛИ характеризуется неоднозначной динамикой с большим разбросом значений. Концентрация лактата в слюне эффективно влияет на показатель люциферазного индекса при низких (до 8 ммоль/л) значениях.

Для классификационной задачи уровень глюкозы демонстрировал противоположную регрессионной зависимость – влияние этого фактора увеличивалось (рис. 3).

При этом сама динамика имела форму насыщения и значимость переходила в плато при уровне глюкозы порядка 5 ммоль/л. Лактат и pH характеризовались картиной, схожей с регрессионной. При 8 ммоль/л лактата появлялся четкий переход уровня

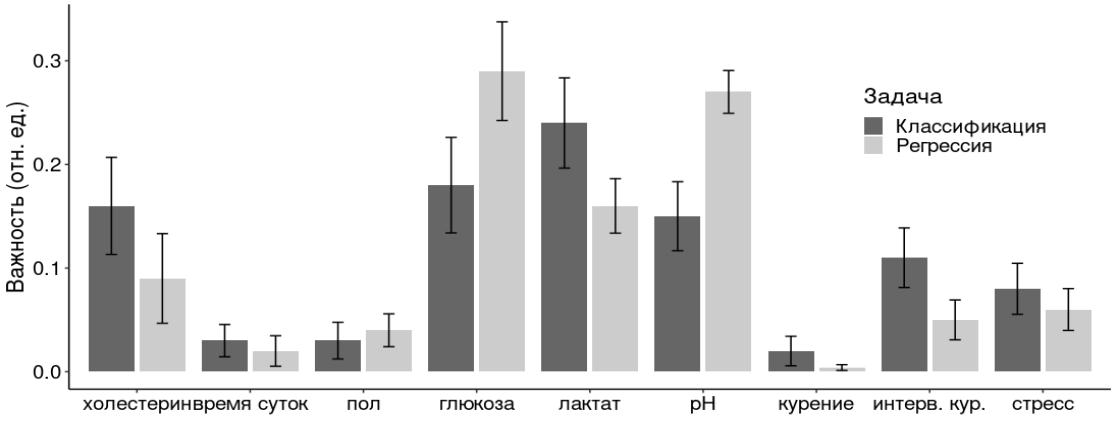


Рис. 1. Распределение факторов по важности влияния на ЛИ в регрессионной и классификационной задачах

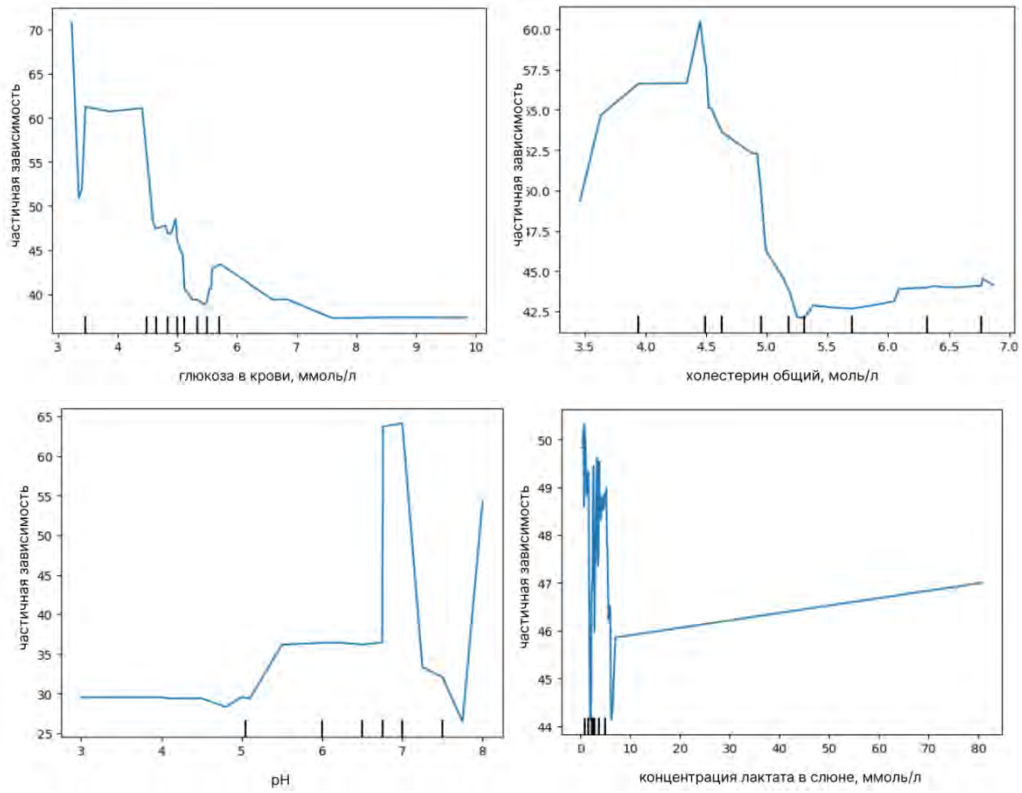


Рис. 2. Графики частичного влияния факторов на целевую переменную (ЛИ) для регрессионной задачи

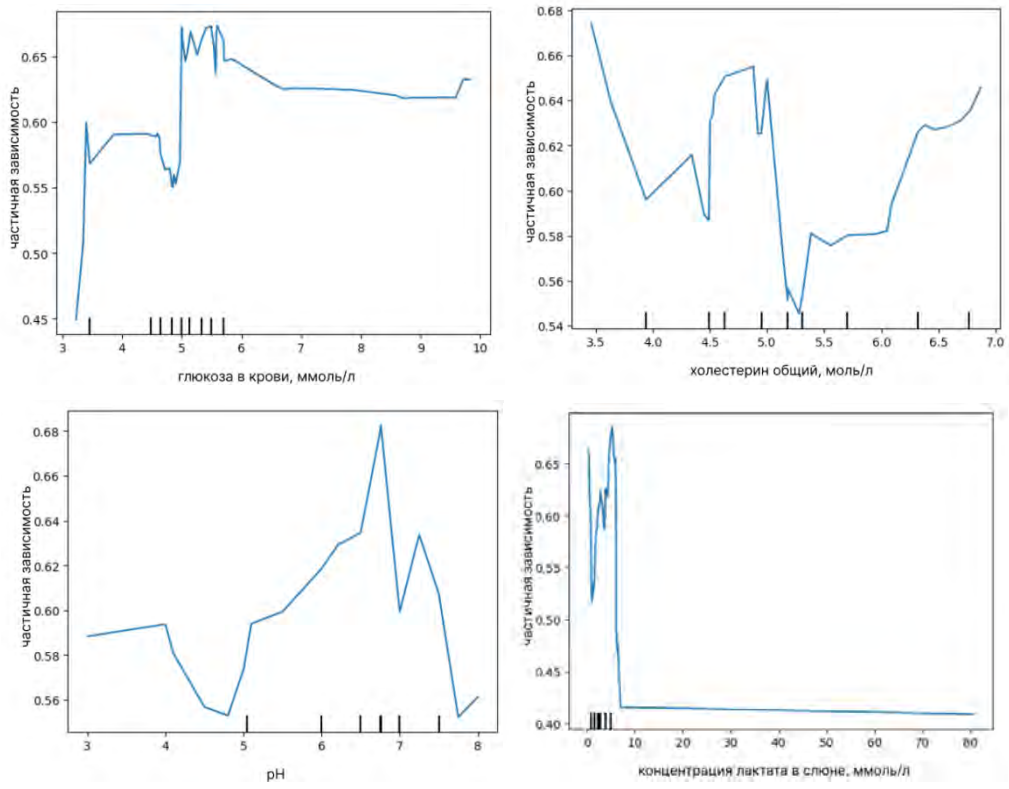


Рис. 3. Графики частичного влияния факторов на целевую переменную (ЛИ) для классификационной задачи

значимости, после которого отсутствовало влияние на люциферазный индекс. Зависимость от pH имела хаотическую динамику с общей тенденцией к росту при увеличении уровня фактора.

Выводы. Анализ факторов, проведенный с использованием алгоритма Random Forest, показал, что не все параметры в равной степени значимы для прогнозирования целевого показателя. Глюкоза демонстрирует противоположные эффекты в регрессионной и классификационной задачах: при регрессии влияние глюкозы уменьшается при превышении уровня в 6 ммоль/л, тогда как в классификации значимость фактора достигает плато при уровне около 5 ммоль/л. Это может указывать на сложные нелинейные взаимоотношения между уровнем глюкозы и состоянием исследуемого материала. Уровень pH также показал различное влияние в зависимости от задачи. При регрессии влияние pH на люциферазный индекс биолюминесцентной системы характеризуется значительной вариабельностью, особенно при увеличении уровня pH. В классификации динамика влияния pH также остается неопределенной, что затрудняет четкое понимание его роли в изменении состояния организма, несмотря на большую значимость для прогноза уровня ЛИ. Лактат показал четкое значение перехода (8 ммоль/л), после которого его влияние на люциферазный индекс значительно снижается. Это указывает на возможность существования порогового значения, после которого лактат перестает быть значимым фактором, что может быть полезно для практического применения в мониторинге состояния работников. Несмотря на низкое значение R^2 (0,175), модель успешно выделяет значимые факторы и демонстрирует высокую классификационную точность. Это указывает на сильную нелинейность и потенциальное наличие скрытых переменных, не учтенных в текущем наборе данных. Исследование не включало в анализ ряд потенциально значимых факторов, таких как физическая активность, стрессовые ситуации вне работы и индивидуальные особенности метаболизма, хотя включение этих параметров могло бы значительно повысить точность и полезность моделей. В дальнейшем планируется провести сравнение эффективности метода Random Forest с классической линейной регрессией, логистической регрессией, XGBoost и нейронными сетями.

Метод случайного леса подходит для выбора информативных факторов, характеризующих особенности персональных характеристик организма в нормальном состоянии и при отклонениях от нормы, позволяет минимизировать количество факторов влияния на ЛИ в случае предварительной настройки теста на персонифицированную работу. Метод Random Forest может быть составной частью персонифицированного биолюминесцентного биосенсора для оценки влияния стрессовых и трудовых нагрузок на организм человека. Предложенный анализ данных может быть применен для обработки и интерпретации результатов различных методик исследования, позволяет анализировать большие объемы данных и выявлять скрытые закономерности, а также позволяет минимизировать риски неверного диагноза и корректировать схему мониторинга исследуемых, что является одним из критических аспектов в биотехнологических и медицинских исследованиях.

Финансирование. Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на реализацию крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект № 075-15-2024-638).

Конфликт интересов. Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Tabak L.A. Point-of-care diagnostics enter the mouth // Ann. N Y Acad. Sci. – 2007. – Vol. 1098. – P. 7–14. DOI: 10.1196/annals.1384.043

2. A Review of Selected Studies That Determine the Physical and Chemical Properties of Saliva in the Field of Dental Treatment / E. Kubala, P. Strzelecka, M. Grzegocka, D. Lietz-Kijak, H. Gronwald, P. Skomro, E. Kijak // BioMed Res. Int. – 2018. – Vol. 2018. – P. 6572381. DOI: 10.1155/2018/657238

3. Saliva diagnostics – Current views and directions / K.E. Kaczor-Urbanowicz, C. Martin Carreras-Presas, K. Aro, M. Tu, F. Garcia-Godoy, D.T. Wong // Exp. Biol. Med. (Maywood). – 2017. – Vol. 242, № 5. – P. 459–472. DOI: 10.1177/1535370216681550

4. Ферментативное биотестирование: научные основы и применение / Е.Н. Есимбекова, И.Г. Торгашина, В.П. Калябина, В.А. Кратасюк // Сибирский экологический журнал. – 2021. – Т. 28, № 3. – С. 364–382. DOI: 10.15372/SEJ20210308

5. A noninvasive and qualitative bioluminescent assay for express diagnostics of athletes' responses to physical exertion / V.A. Kratasyuk, L.V. Stepanova, R. Ranjan, O.S. Sutormin, S. Pande, G.V. Zhukova, O.M. Miller, N.V. Maznyak, O.A. Kolenchukova // Luminescence. – 2021. – Vol. 36, № 2. – P. 384–390. DOI: 10.1002/bio.3954

6. Jordan M.I., Mitchell T.M. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects // Science. – 2015. – Vol. 349, № 6245. – P. 255–260. DOI: 10.1126/science.aaa8415

7. Бельская Л.В., Сарф Е.А. Применение ИК-Фурье-спектроскопии слюны для экспресс-оценки уровня продуктов перекисного окисления липидов // Biomedical Chemistry: Research and Methods. – 2019. – Т. 2, № 2. – С. e00094. DOI: 10.18097/BMCRM00094

8. Бельская Л.В., Сарф Е.А., Косенок В.К. Корреляционные взаимосвязи состава слюны и плазмы крови в норме // Клиническая лабораторная диагностика – 2018. – Т. 63, № 8. – С. 477–482. DOI: 10.18821/0869-2084-2018-63-8-477-482

9. Никонорова М.Л. Построение оптимальных моделей анализа биомедицинских данных // Вестник новых медицинских технологий. – 2021. – Т. 28, № 1. – С. 55–59. DOI: 10.24412/1609-2163-2021-1-55-59

10. Берестнева О.Г., Осадчая И.А., Немерово Е.В. Методы исследования структуры медицинских данных // Вестник науки Сибири. – 2012. – Т. 1, № 2. – С. 333–338.

11. Клименко А.В., Слащев И.С. Кластерный анализ данных // Вестник науки. – 2019. – № 1 (10), Т. 1. – С. 159–163.

12. Using machine learning and an electronic tongue for discriminating saliva samples from oral cavity cancer patients and healthy individual / D.C. Braz, M. Popolin Neto, F.M. Shimizu, A.C. Sá, R.S. Lima, A.L. Gobbi, M.E. Melendez, L.M.R.B. Arantes [et al.] // Talanta. – 2022. – Vol. 243. – P. 123327. DOI: 10.1016/j.talanta.2022.123327

13. Microbiome of Saliva and Plaque in Children According to Age and Dental Caries Experience / E. Lee, S. Park, S. Um, S. Kim, J. Lee, J. Jang, H.-O. Jeong, J. Shin [et al.] // Diagnostics (Basel). – 2021. – Vol. 11, № 8. – P. 1324. DOI: 10.3390/diagnostics11081324

14. Finding distinctions between oral cancer and periodontitis using saliva metabolites and machine learning / V.L. Kouznetsova, J. Li, E. Romm, I.F. Tsigelny // Oral Dis. – 2021. – Vol. 27, № 3. – P. 484–493. DOI: 10.1111/odi.13591

15. Zarrin P.S., Roeckendorf N., Wenger C. In-Vitro Classification of Saliva Samples of COPD Patients and Healthy Controls Using Machine Learning Tools // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 168053–168060. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023971

16. Salivary metabolomics with alternative decision tree-based machine learning methods for breast cancer discrimination / T. Murata, T. Yanagisawa, T. Kurihara, M. Kaneko, S. Ota, A. Enomoto, M. Tomita, M. Sugimoto [et al.] // Breast Cancer Res. Treat. – 2019. – Vol. 177, № 3. – P. 591–601. DOI: 10.1007/s10549-019-05330-9

17. Applications of machine learning in routine laboratory medicine: Current state and future directions / N. Rabbani, G.Y.E. Kim, C.J. Suarez, J.H. Chen // Clin. Biochem. – 2022. – Vol. 103. – P. 1–7. DOI: 10.1016/j.clinbiochem.2022.02.011

18. The oral microbiome of pregnant women facilitates gestational diabetes discrimination / X. Li, J. Zheng, X. Ma, B. Zhang, J. Zhang, W. Wang, C. Sun, Y. Wang [et al.] // J. Genet. Genomics. – 2021. – Vol. 48, № 1. – P. 32–39. DOI: 10.1016/j.jgg.2020.11.006

19. Salivary metabolomics with machine learning for colorectal cancer detection / H. Kuwabara, K. Katsumata, A. Iwabuchi, R. Udo, T. Tago, K. Kasahara, J. Mazaki, M. Enomoto [et al.] // Cancer Sci. – 2022. – Vol. 113, № 9. – P. 3234–324. DOI: 10.1111/cas.15472

20. Alam M.Z., Rahman M.S., Rahman M.S. A Random Forest based predictor for medical data classification using feature ranking // Informatics in Medicine Unlocked. – 2019. – Vol. 15. – P. 100180. DOI: 10.1016/j.imu.2019.100180

21. Применение биолюминесцентного ферментативного биотеста для анализа слюны работников железнодорожного транспорта с целью мониторинга функционального состояния организма в условиях трудовой деятельности / Л.В. Степанова, О.А. Коленчукова, Г.В. Жукова, О.С. Сутормин, В.А. Кратасюк // Биофизика. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 674–683. DOI: 10.31857/S0006302924030224

Метод Random Forest в задачах интерпретации результатов биолюминесцентного анализа слюны при персонализированной диагностике / Г.В. Жукова, П.А. Мартыщук, Е.Р. Афер, А.Н. Шуваев, Н.А. Розанова, Д.В. Сергеев, В.А. Кратасюк // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 2. – С. 166–174. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.14

UDC 519.254:519.257
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.14.eng

Read online

Research article

RANDOM FOREST METHOD FOR INTERPRETING RESULTS OBTAINED BY BIOLUMINESCENCE ANALYSIS OF SALIVA IN PERSONALIZED DIAGNOSTICS

G.V. Zhukova[1], P.A. Martyshuk[1], E.R. Afer[1], A.N. Shuvaev[1], N.A. Rozanova[2], D.V. Sergeev[2], V.A. Kratasyuk[1, 3]

[1]Siberian Federal University, 79 Svobodnyi Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
[2]Research Center for Neurology, 80 Volokolamskoe highway, Moscow, 125367, Russian Federation
[3]Institute of Biophysics, Siberian Department of the RAS, separate division of the Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Department of the Russian Academy of Sciences, 50 Akademgorodok, build. 50, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

Development of personalized medicine and biotechnologies is directly linked to obtaining relevant data, which largely depend on individual characteristics of examined patients. Permissible ranges of analyzed indicators that are commonly used in conventional medicine do not always describe a patient's health adequately. It seems necessary to search for such data analysis techniques, which allow considering variable individual peculiarities of patients' bodies and their lifestyles.

The aim of this study is to determine whether it is possible to use the Random Forest method for biomedical data analysis in order to achieve correct interpretation of results obtained by personalized diagnostic tests. Bioluminescent testing is used as an example since it estimates effects produced by various characteristics of examined patients and their living conditions. The method allows minimizing risks of incorrect diagnosis and adjusting monitoring schemes for specific patients.

This study relies on using the results obtained by diagnosing workloads of railway workers using the bioluminescence method. A patient's health is assessed by examining effects produced by a patient's saliva on intensity of the bi-enzyme system luminescence: NAD(P)H:FMN oxidoreductase + luciferase. This analysis is integral and responses to many factors,

each of which can influence the analysis result. Effectiveness of various methods for data analysis is assessed on an example group made of traffic controllers employed by the Krasnoyarsk Branch of Russian Railways JSC. Both statistical methods and the Random Forest machine learning algorithm were used for data analysis.

As a result, our study has revealed that it is advisable to use the Random Forest method for assessing significance of some biochemical saliva indicators to predict health of railway workers. The method makes it possible to identify the most significant factors and create graphs to show partial influence exerted by various factors on the target variable. This study allows optimizing the system for health diagnostics using integral bioluminescence analysis. The Random Forest method can become a component of a personalized bioluminescent biosensor for assessing effects produced by stress and workloads on the body.

Keywords: *personalized diagnostics, machine learning, data analysis, multifactorial analysis, saliva, bioluminescence, biosensor, signal systems.*

References

1. Tabak L.A. Point-of-care diagnostics enter the mouth. *Ann. N Y Acad. Sci.*, 2007, vol. 1098, pp. 7–14. DOI: 10.1196/annals.1384.043

2. Kubala E., Strzelecka P., Grzegocka M., Lietz-Kijak D., Gronwald H., Skomro P., Kijak E. A Review of Selected Studies That Determine the Physical and Chemical Properties of Saliva in the Field of Dental Treatment. *BioMed Res. Int.*, 2018, vol. 2018, pp. 6572381. DOI: 10.1155/2018/657238

3. Kaczor-Urbanowicz K.E., Carreras-Presas C.M., Aro K., Tu M., Garcia-Godoy F., Wong D.T. Saliva diagnostics – Current views and directions. *Exp. Biol. Med. (Maywood)*, 2017, vol. 242, no. 5, pp. 459–472. DOI: 10.1177/1535370216681550

4. Esimbekova E.N., Torgashina I.G., Kalyabina V.P., Kratasyuk V.A. Enzymatic Biotesting: Scientific Basis and Application. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2021, vol. 14, pp. 290–304. DOI: 10.1134/S1995425521030069

5. Kratasyuk V.A., Stepanova L.V., Ranjan R., Sutormin O.S., Pande S., Zhukova G.V., Miller O.M., Maznyak N.V., Kolenchukova O.A. A noninvasive and qualitative bioluminescent assay for express diagnostics of athletes' responses to physical exertion. *Luminescence*, 2021, vol. 36, no. 2, pp. 384–390. DOI: 10.1002/bio.3954

6. Jordan M.I., Mitchell T.M. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 2015, vol. 349, no. 6245, pp. 255–260. DOI: 10.1126/science.aaa8415

7. Bel'skaya L., Sarf E. The use of Fourier transform IR spectroscopy of saliva for rapid assessment of the level of lipid peroxidation products. *Biomedical Chemistry: Research and Methods*, 2019, vol. 2, no. 2, pp. e00094. DOI: 10.18097/BMCRM00094 (in Russian).

8. Bel'skaya L.V., Sarf E.A., Kosenok V.K. Correlation interrelations between the composition of saliva and blood plasmain norm. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika*, 2018, vol. 63, no. 8, pp. 477–482. DOI: 10.18821/0869-2084-2018-63-8-477-482 (in Russian).

9. Nikonorova M.L. Building optimal models for analysis of biomedical data. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii*, 2021, vol. 28, no. 1, pp. 55–59. DOI: 10.24412/1609-2163-2021-1-55-59 (in Russian).

10. Berestneva O.G., Osadchaya I.A., Nemerov E.V. Methods for studying the medical data structure. *Vestnik nauki Sibiri*, 2012, vol. 1, no. 2, pp. 333–338 (in Russian).

11. Klimenko A.V., Slashchev I.S. Klasternyi analiz dannykh [Cluster data analysis]. *Vestnik nauki*, 2019, no. 1 (10), vol. 1, pp. 159–163 (in Russian).

12. Braz D.C., Popolin Neto M., Shimizu F.M., Sá A.C., Lima R.S., Gobbi A.L., Melendez M.E., Arantes L.M.R.B. [et al.]. Using machine learning and an electronic tongue for discriminating saliva samples from oral cavity cancer patients and healthy individual. *Talanta*, 2022, vol. 243, pp. 123327. DOI: 10.1016/j.talanta.2022.123327

13. Lee E., Park S., Um S., Kim S., Lee J., Jang J., Jeong H.-O., Shin J. [et al.]. Microbiome of Saliva and Plaque in Children According to Age and Dental Caries Experience. *Diagnostics (Basel)*, 2021, vol. 11, no. 8, pp. 1324. DOI: 10.3390/diagnostics11081324

© Zhukova G.V., Martyshuk P.A., Afer E.R., Shuvaev A.N., Rozanova N.A., Sergeev D.V., Kratasyuk V.A., 2025

Galina V. Zhukova – Junior Researcher of Bioluminescent Technologies Laboratory (e-mail: gvivanova@sfu-kras.ru; tel.: +7 (913) 047-88-37; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8646-1224).

Polina A. Martishuk – student of the Institute of Fundamental Biology and Biotechnology (e-mail: p.martishuk@yandex.ru; tel.: + 7 (904) 896-97-34).

Egor R. Afer – student of the Institute of Fundamental Biology and Biotechnology (e-mail: egorafer@yandex.ru; tel.: +7 (902) 957-64-89).

Andrey N. Shuvaev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Basic Department of Biomedical Systems and Complexes of the Institute of Fundamental Biology and Biotechnology (e-mail: ashuvaev@sfu-kras.ru; tel.: +7 (950) 997-77-92; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3887-1413).

Natalia A. Rozanova – graduate student, laboratory research assistant at Brain Institute's Neurobiology and Tissue Engineering Laboratory (e-mail: nataliarozanovaa@gmail.com; tel.: +7 (968) 030-47-28; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9619-4679).

Dmitry V. Sergeev – Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, Neurologist (e-mail: sergeev@neurology.ru; tel.: +7 (926) 860-08-97; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9130-1292).

Valentina A. Kratasyuk – Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of Biophysical Department of the Institute of Fundamental Biology and Biotechnology; Leading Researcher (e-mail: valkrat@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6764-5231).

14. Kouznetsova V.L., Li J., Romm E., Tsigelny I.F. Finding distinctions between oral cancer and periodontitis using saliva metabolites and machine learning. *Oral Dis.*, 2021, vol. 27, no. 3, pp. 484–493. DOI: 10.1111/odi.13591

15. Zarrin, P.S., Roeckendorf N., Wenger C. In-Vitro Classification of Saliva Samples of COPD Patients and Healthy Controls Using Machine Learning Tools. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 168053–168060. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023971

16. Murata T., Yanagisawa T., Kurihara T., Kaneko M., Ota S., Enomoto A., Tomita M., Sugimoto M. [et al.]. Salivary metabolomics with alternative decision tree-based machine learning methods for breast cancer discrimination. *Breast Cancer Res. Treat.*, 2019, vol. 177, no. 3, pp. 591–601. DOI: 10.1007/s10549-019-05330-9

17. Rabbani N., Kim G.Y.E., Suarez C.J., Chen J.H. Applications of machine learning in routine laboratory medicine: Current state and future directions. *Clin. Biochem.*, 2022, vol. 103, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.clinbiochem.2022.02.011

18. Li X., Zheng J., Ma X., Zhang B., Zhang J., Wang W., Sun C., Wang Y. [et al.]. The oral microbiome of pregnant women facilitates gestational diabetes discrimination. *J. Genet. Genomics*, 2021, vol. 48, no. 1, pp. 32–39. DOI: 10.1016/j.jgg.2020.11.006

19. Kuwabara H., Katsumata K., Iwabuchi A., Udo R., Tago T., Kasahara K., Mazaki J., Enomoto M. [et al.]. Salivary metabolomics with machine learning for colorectal cancer detection. *Cancer Sci.*, 2022, vol. 113, no. 9, pp. 3234–3243. DOI: 10.1111/cas.15472

20. Alam M.Z., Rahman M.S., Rahman M.S. A Random Forest based predictor for medical data classification using feature ranking. *Informatics in Medicine Unlocked*, 2019, vol. 15, pp. 100180. DOI: 10.1016/j.imu.2019.100180

21. Stepanova L.V., Kolenchukova O.A., Zhukova G.V., Sutormin O.S., Kratasyuk V.A. The Use of the Bioluminescent Enzyme Bioassay for the Analysis of Saliva of Railway Transport Workers to Monitor the Functional State of the Body in the Conditions of Labor Activity. *Biofizika*, 2024, vol. 69, no. 3, pp. 674–683. DOI: 10.31857/S0006302924030224 (in Russian).

Zhukova G.V., Martyshuk P.A., Afer E.R., Shuvaev A.N., Rozanova N.A., Sergeev D.V., Kratasyuk V.A. Random Forest method for interpreting results obtained by bioluminescence analysis of saliva in personalized diagnostics. Health Risk Analysis, 2025, no. 2, pp. 166–174. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.14.eng

Получена: 22.12.2024
Одобрена: 07.05.2025
Принята к публикации: 14.06.2025

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОБЗОРЫ

УДК 57.042+57.049+ 612.1+614
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.15

Читать онлайн

Научный обзор

СИСТЕМНЫЕ ЭФФЕКТЫ РАДИОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ (ОБЗОР). ЧАСТЬ 1. ЖЕЛЕЗЫ СЕКРЕЦИИ

Н.И. Хорсева[1], П.Е. Григорьев[2,3]

[1]Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля, Российская Федерация, 119334, г. Москва, ул. Косыгина, 4
[2]Севастопольский государственный университет, Российская Федерация, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
[3]Академический научно-исследовательский институт физических методов лечения, медицинской климатологии и реабилитации имени И.М. Сеченова, Российская Федерация, 298603, Республика Крым, г. Ялта, ул. Мухина, 10/3

Среди публикаций о системных эффектах электромагнитных полей радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ), прежде всего присущих устройствам сотовой связи (чаще всего – от 900 МГЦ до 2,5 ГГц), а также Wi-Fi, отдельного рассмотрения заслуживает их влияние на структурные изменения в железах секреции, которые зачастую являются непосредственными мишенями для воздействия соответствующих ЭМП РЧ (например, щитовидная железа).

Установлены разнообразные патогистологические эффекты влияния хронического воздействия ЭМП РЧ в разных режимах на железы внешней секреции как в экспериментальных исследованиях на животных, так и в эпидемиологических. Среди них – околоушная железа, слюнные железы, потовые железы.

Железы внутренней секреции также могут быть подвержены влиянию ЭМП РЧ, что подтверждается результатами многочисленных работ в отношении эпифиза, гипофиза, щитовидной железы, надпочечников, в которых зарегистрированы изменения их структуры и функций как у экспериментальных животных, так и у людей. При этом существует достаточно выраженная зависимость эффектов от экспозиции и характеристик ЭМП РЧ.

В настоящее время надежно установлены биологические эффекты действия ЭМП РЧ различных частотных диапазонов (устройства сотовой связи и телекоммуникационные мачты). Зарегистрированы разнообразные гистопатологические изменения в железах смешанной секреции – печени, поджелудочной железе, яичках и яичниках. Особо актуальными представляются выявленные на экспериментальных животных серьезные нарушения в яичках и яичниках, которые, несомненно, приводят к нарушениям репродуктивной функции.

Как отмечается, особую тревогу вызывает, что пользователи сотовой связи разных возрастов, в первую очередь дети и подростки, носят мобильные устройства в карманах брюк, т.е. в непосредственной близости к половым железам.

Настоящий период также характеризуется накоплением сравнительных эпидемиологических данных, а также неинвазивных измерений структурно-функциональных изменений в железах секреции у людей. На их основании следует сделать однозначный вывод о необходимости ограничения и мер предосторожности использования сотовых устройств, о чем также указывают некоторые рассматриваемые в данном обзоре работы.

Ключевые слова: *электромагнитные поля радиочастотного диапазона, устройства сотовой связи, Wi-Fi, железы внутренней секреции, железы внешней секреции, железы смешанной секреции, гистологические изменения, молодые животные.*

© Хорсева Н.И., Григорьев П.Е., 2025

Хорсева Наталия Игоревна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химических проблем радиобиологии и экологии (e-mail: sheridan1957@mail.ru; тел.: 8 (905) 782-87-17; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3444-0050).

Григорьев Павел Евгеньевич – доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры психологии; ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела физиотерапии, медицинской климатологии и курортных факторов (e-mail: mhnty@ya.ru; тел.: 8 (978) 767-22-10; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7390-9109).

Железы внешней секреции. Можно считать доказанным негативное влияние электромагнитных полей радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) на структуры головного мозга [1]. Следовательно, в связи с этим можно предположить, что излучение ЭМП РЧ сотовых телефонов может «затронуть» и железы секреции, в частности, ***околоушную железу***.

Несмотря на единичные исследования, в работе S. Sadetzki et al. было показано увеличение риска развития рака околоушной железы у пользователей мобильной связью [2], а в экспериментах Z. Ozergin Coskun et al. были установлены и гистопатологические изменения в околоушной железе у крыс при воздействии 1800 МГц (6 и 12 ч/сут в течение 30 дней): увеличение апоптотического индекса, более выраженное при более длительном воздействии [3]. Зависимость уровня гистопатологических изменений от длительности воздействия ЭМП РЧ 2100 МГц (6 ч/сут 5 дней в неделю в течение 10 или 40 дней) была установлена в работе F. Aydogan et al. Более выраженные изменения в гистологии слюнных желез (в ацинарных эпителиальных клетках, интерстициальном пространстве, протоковой системе, сосудистой системе, ядре, количестве цитоплазмы и изменения в размере клеток) были зарегистрированы при длительном воздействии (40 дней) [4].

Кроме того, нарушение саливации (снижение слюноотделения) было зарегистрировано у лиц как в возрастной группе 18–30 лет, так и в группе 30–60 лет, которые жили не менее 8 лет на расстоянии около 1 км от базовых станций [5].

Активное внедрение пятого поколения сотовой связи 5G, где потенциально используются два диапазона частот: 600–60 000 МГц и 24–100 ГГц (в России – 4,8–4,99 и 24,25–24,65 ГГц), по мнению Ю.Г. Григорьева, «…может привести к значительному повышению уровня опасности в связи с постоянным облучением новых критических органов, таких как кожа и глаза» [6]. Недооценка потенциальных рисков может быть фатальной.

Так, в обзоре K. Karipidis et al. [7] авторы утверждают, что имеющиеся результаты, в частности, эпидемиологических исследований, имеют мало доказательств связи между низкоуровневым миллиметровым диапазоном и какими-либо неблагоприятными эффектами для здоровья, поскольку они ниже пределов воздействия на человека, установленных Международной комиссией по защите от неионизирующего излучения (ICNIRP). Однако такая точка зрения подверглась критике со стороны S. Weller et al., так как он дает неверные посылы относительно оценки безопасности и общественного здравоохранения [8].

Поскольку новыми критическими органами миллиметрового диапазона являются склера глаз и кожа, то многочисленные ***потовые железы*** будут также вовлечены в сферу действия ЭМР РЧ.

В связи с этим интересны работы S.R. Tripathi et al. [9] и N. Betzalel et al. [10]. Используя оптическую когерентную томографию, они установили, что кончики потовых протоков имеют спиральную структуру и рассматриваются как спиральная антенна. Резонансная частота такой антенны в аксиальном (осевом) режиме работы лежит в ТГц-диапазоне волн с центральной частотой 0,44 ± 0,07 ТГц [9], что может приводить к высокой удельной скорости поглощения (SAR) кожей в диапазоне крайне высоких частот [10].

Кроме того, экспериментально установлено, что отражательная способность кожи человека в субтеррагерцовом (субТГц) диапазоне, который активно продвигают сотовые операторы на рынок сотовой связи (в частности, 5G), зависит от интенсивности потоотделения и коррелирует не только с уровнем стресса человека, но и показателями ЭКГ. В связи с этим необходимо учитывать возможные последствия неограниченного использования субтеррагерцовых технологий – 5G [10] и новых диапазонов – 6G для общественного здравоохранения.

Мы полагаем, что приведенные доказательства должны быть учтены при широкомасштабном внедрении новых технологий сотовой связи, поскольку критическим органом в данном случае является кожа человека, а с учетом ее площади восприятия (1,5–2 м^2 у взрослого человека) может быть уже не потенциальной, а явной угрозой для здоровья человека, в первую очередь детей и подростков как самой чувствительной когорты населения к любым факторам внешней среды.

Железы внутренней секреции. Как уже отмечалось ранее, можно считать доказанным негативное влияние ЭМП РЧ на структуры головного мозга [1], поэтому такие железы внутренней секреции, как ***эпифиз*** (область четверохолмия среднего мозга) и ***гипофиз*** (промежуточный мозг), также могут быть подвержены этому влиянию. Подтверждением этому могут служить результаты исследований, приведенных ниже.

Влияние ***на эпифиз*** представлено в исследовании С.Г. Ященко и С.Ю. Рыбалко, проведенном на молодых крысах. Было изучено влияние ЭМП РЧ современных коммуникационных устройств – персональных компьютеров (ПК) (4 ч/сут в течение 26 недель) и мобильных телефонов (МТ) (925 МГц, каждые 5 мин в течение 12 ч в течение 26 недель, плотности потока мощности (ППМ) в центре клетки достигали значений 97,8 мкВт/см^2 со средним интегральным значением 22 мкВт/см^2). Было установлено, что в обеих группах в эпифизе изменяется ультраструктура ткани с развитием комплекса общих и специфических морфологических изменений для каждого вида воздействия – ПК и МТ. Полученные результаты указывают на негативное влияние ЭМП РЧ на эпифиз [11].

Использование электрофотоизображения или газоразрядной визуализации после 15-минутного воздействия МТ на студентов (17,40 ± 0,24 года) позволило зарегистрировать снижение уровня тон-

кой энергии в ряде органов (поджелудочная железа, щитовидная железа, кора головного мозга, сосуды головного мозга, левое ухо и левый глаз, печень, правая почка, селезенка и иммунная система), в том числе и ***в гипофизе*** [12].

В настоящее время при использовании нового поколения мобильных телефонов – смартфонов, у которых расположение антенн находится внизу гаджета, возникла новая ситуация – увеличение электромагнитного воздействия на область шеи, которое подтверждается оценкой распределения поглощенных доз в данной области, и новым критическим органом в этом случае становится ***щитовидная железа*** [13, 14].

Различные изменения в структуре и функции щитовидной железы, а также изменение гормонального статуса при воздействии ЭМП РЧ суммированы в ряде обзоров [15, 16], в том числе на детей и подростков [14].

Также ***экспериментально*** установлены гистологические и биохимические изменения в клетках щитовидной железы крыс и мышей при воздействии ЭМП РЧ в диапазоне от 900 Мгц до 2,45 ГГц. В экспериментах на молодых крысах зарегистрировано уменьшение количества кубических клеток, фолликулярной коллоидной жидкости и диаметра фолликулов при действии ЭМП РЧ МТ (900 МГц, 10 мин 12 раз в сутки в течение месяца) [17], а образование апоптотических телец и повышенная активность каспазы-3 и каспазы-9 в клетках щитовидной железы зарегистрировано при импульсно-модулированном сигнале МТ (900 МГц, модуляция 217 МГц, 20 мин/сут в течение 2 месяцев) [18].

Воздействие ЭМП РЧ МТ с двойным трансивером 900/1800 МГц (50 звонков по 30 с, разделенных 15-секундными интервалами, в течение 8 недель) вызывало уменьшение содержания коллоида в микрофолликулах, увеличение в ширину соединительнотканных перегородок и расширение кровеносных сосудов [19].

Для изучения воздействия 2,45 ГГц на щитовидную железу крыс M.J. Misa-Agustiño et al. использовали модель диатермии при максимальном воздействии в левую переднюю ногу животных. Проводили однократное (30 мин/сут, 3 и 12 Вт) и многократное (30 мин/сут, 3 Вт, в течение 2 недель), воздействие ЭМП РЧ. Морфометрические измерения ткани щитовидной железы проводились спустя 90 мин и 24 ч после последнего воздействия во всех экспериментальных группах. Признаки апоптоза клеток щитовидной железы не выявлены, равно как и изменения толщины перегородок в центральной части соединительной ткани, однако установлены особенности изменения диаметра центральных и периферических фолликулов, которые указывают на гипертрофию железы в отношении мощности воздействия и / или количества воздействий [20].

Исследования с участием детей и подростков, а также лиц до 25 лет выявили широкий спектр изменений при действии ЭМП РЧ на щитовидную железу.

В настоящее время установлено, что ЭМП РЧ базовых станций может оказывать негативное влияние на гормональный фон лиц, проживающих рядом с базовыми станциями. В частности, в работе E.F. Eskander представлены результаты динамики изменения гормонального фона для юношей / мужчин и девушек / женщин (14–22 года и 25–60 лет соответственно) с увеличением периода воздействия (через год, 3 года и 6 лет), проживающих в 500-метровой зоне от базовых станций. Было показано, что наибольшие изменения выявлены при 6-летнем воздействии: для всех групп значимое снижение уровня как щитовидной железы – сывороточного тироксина (T_4) и трийодтиронина (T_3), так и адренокортикотропного гормона (АКТГ), а также половых гормонов (снижение уровня тестостерона у юношей / мужчин, уровня пролактина в сыворотке у девушек, но его увеличение у взрослых женщин) [21].

С целью изучения воздействия ЭМП РЧ МТ на щитовидную железу человека проводится анализ уровней гормонов [22], клинические обследования [23], УЗИ-исследования с одновременным применением методов анкетирования.

Так, при анкетировании 77 студентов с различным режимом пользования МТ: 5–20 мин/сут, более 120 мин/сут, и одновременным анализом уровней гормонов было установлено, что у пользователей мобильной связью высокий (выше, чем обычно) уровень тиреотропного гормона, низкие средние значения T_4 и нормальные концентрации T_3, при этом степень выраженности этих изменений была наивысшей у активных пользователей [22].

Похожие исследования были проведены N.M. Baby et al. с участием 83 студентов (18–25 лет). 53 % опрошенных в среднем ежедневно разговаривали по телефону по 0,5 ч; 28,9 % – по 1,5 ч в день и 10,8 % – по 3,5 ч. Клиническое обследование щитовидной железы показало, что 13,6 % имели отек, 3,6 % – симптомы дисфункции, 3,6 % – дисфункции с признаками отека, а также наличие значимой корреляции между общим воздействием радиации и повышением значений ТТГ среди всех респондентов [23].

Проспективное исследование с целью изучения ЭМП РЧ МТ на щитовидную железу было проведено N.M. Elsayed et al. (110 женщин и 70 мужчин в возрасте от 15 до 65 лет). Результаты УЗИ в исследовании показали, что 46,7 % респондентов имели аномальные результаты щитовидной железы, чаще у пользователей смартфонов и больше у женщин. Наиболее распространенной аномалией был многоузловой зоб (54 %) [24].

На основании материалов статистических отчетов по заболеваемости населения в Российский Федерации болезнями эндокринной системы, расстройствами питания и нарушением обмена веществ установлено, что с 2000 г. зарегистрировано значительное увеличение числа детей и подростков с бо-

лезнями эндокринной системы, расстройствами питания, нарушением обмена веществ: для возрастной группы 0–14 лет – в 2,8 раза, а для 15–17-летнего возраста – в 5,5 раза [14].

Известно, что формирование основных структур ***тимуса***, в частности у крыс, продолжается и в постнатальном развитии [25]. Следовательно, исследование воздействия ЭМП РЧ может оказать существенное влияние в этот период времени. Подтверждением этому могут служить единичные исследования, проведенные на молодых крысах.

Так, при воздействии 900 МГц (1 ч/сут в течение 22–59 дней после рождения) выявили гистопатологические изменения в ткани тимуса: зарегистрированы внесосудистые эритроциты в медуллярных / кортикомедуллярных областях [26]. Исследование острого (одна неделя) и хронического (10 недель) воздействия ЭМП РЧ на молодых крыс в двух частотных диапазонах (900 и 2100 МГц, 2 ч/сут) позволило установить увеличение экспрессии каспазы 3 и 12, шлюкозо-регулируемого белка 78 кДа (Grp78), C/EBP гомологичного белка, что указывает на увеличение уровня белкового стресса и может вызвать апоптоз клеток тимуса [27].

M.J. Misa-Agustiño et al., как и для изучения воздействия ЭМП РЧ на щитовидную железу, использовали модель диатермии для исследования влияния 2,45 ГГц (мощностью 1,5, 3,0 или 12,0 Вт, 30 мин/сут в течение одной и 10 недель) на тимус молодых крыс. Увеличение количества кровеносных сосудов (было более заметно в мозговом веществе), геморрагических ретикулоэпителиальных клеток и эритроцитов у животных, облученных 12,0 Вт (SAR, рассчитанный на 1 г ткани тимуса, составляет $0{,}482 \pm 12{,}10^{-3}$ Вт/кг). При этом эффект зависел только от мощности воздействия, а не от длительности. Кроме того, было установлено, что существует связь между воздействием ЭМП РЧ и повышенной эндотелиальной проницаемостью и васкуляризацией тимуса [28].

Не исключено, что выявленные гистопатологические изменения в тимусе экспериментальных животных при действии ЭМП РЧ могут также наблюдаться и у лиц – пользователей мобильной связью, которые носят МТ в кармане рубашки. Но данное предположение требует дальнейшего исследования.

Известно, что поддержание гомеостаза организма, обеспечение адаптации к различным физиологическим и эмоциональным ситуациям осуществляют гормоны ***надпочечников.*** Однако исследования в области изучения воздействия ЭМП РЧ на надпочечники единичны.

В доступной нам литературе мы нашли только две публикации: A. Kocaman et al. и S. Shahabi et al. Оба исследования проведены на молодых крысах линии Wistar, подвергавшихся воздействию ЭМП частотой 900 МГц.

В работе A. Kocaman et al. при воздействии ЭМП РЧ 60 мин/сут в течение 15 дней зарегистрировано значительное увеличение среднего объема надпочечников [29]. А в исследовании S. Shahabi et al., где воздействие ЭМП РЧ было более интенсивное (6 ч/сут в течение 4 и 8 недель соответственно), было установлено утолщение пучкового слоя надпочечников, при этом количество клеток в этой зоне оставалось постоянным, однако их размер и периметр клеток увеличивались. Описанные изменения были более выражены для 8-недельного воздействия [30].

Поскольку негативные изменения были зарегистрированы как в гипофизе [12], так и в надпочечниках, как показано выше [29, 30], можно предположить, что ЭМП РЧ может оказывать влияние на гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковую ось – нейроэндокринную систему, поддерживающую гомеостаз организма, адаптацию к факторам внешней среды и выживание во время стресса, что может вызывать различные системные ответы на воздействие ЭМП РЧ.

Железы смешанной секреции. К этой группе желез относится печень, поджелудочная железа, а также половые железы: мужские – яички, женские – яичники.

Однако число публикаций по изучению воздействия ЭМП РЧ на печень и яички невелико, а для поджелудочной железы и яичников – единичные.

В частности, при действии 900 МГц (1, 2 и 4 ч/сут в течение 30 дней) M. Sepehrimanesh et al. установлено, что ***в печени*** не выявлено никаких существенных гистопатологических поражений [31]. Однако в работах H.R. Ma et al. [32] и D.Ö. Okatan et al. [33], даже при менее длительном воздействии ЭМП РЧ, были обнаружены гистопатологические изменения.

В первом случае (4 ч/сут в течение 18 дней) выявлено диффузное набухание и вакуолизация гепатоцитов, мелкие кусочки и очаговый некроз [32], а во втором (1 ч/сут в течение 24 дней) случайные нарушения в радиальном расположении гепатоцитов, цитоплазматическая вакуолизация, кровоизлияние, расширение синусоид и отек [33].

ЭМП РЧ двухдиапазонного телефона Nokia 1112 (900/1800 или 950/1900 МГц) при действии в течение 10 дней на взрослых мышей при ежедневной нагрузке 1 ч/сут вызывало воспалительную клеточную инфильтрацию, а гепатоциты выглядели вакуолизированными и содержали более плотные ядра, а при нагрузке 12 ч/сут на срезах печени выявлена более интенсивная воспалительная реакция вокруг центральной вены, гепатоциты были также набухшими, а их цитоплазма казалась сильно вакуолизированной [34].

Воздействие 2,45 ГГц отличается от действия 900 МГц. Как показали гистопатологические исследования K. Holovská et al. (3 ч/сут в течение 3 недель), структура гепатоцитов не изменилась, однако их электронная микроскопия выявила везикулы разного размера и формы, липидные капли и разрастание гладкой эндоплазматической сети, а также на-

блюдались некротические гепатоциты. Кроме того, установлено наличие умеренной гиперемии, дилатации синусоидов печени и небольших воспалительных очагов в центре долек печени [35]. Полностью искаженная печеночная архитектура и удлиненные ядра с цитоплазмой некоторых гепатоцитов выявлены в работе P. Chauhan et al. (2 ч/сут в течение 35 дней) [36].

Позднее E.A. Adebayo et al. установили выраженные расширенные синусоиды, искаженную архитектуру, гиперхромные ядра, переполненную центральную вену с изменением структуры гепатоцитов у крыс, помещенных на расстоянии 24 м от основания двух различных мачт телекоммуникационной сети (1800 МГц) в течение 5 недель (1,40 Вт/см^2) [37].

Таким образом, воздействие как ЭМП РЧ мобильных телефонов, так и базовых станций могут вызывать гистопатологические изменения в тканях печени экспериментальных животных.

Негативные гистопатологические изменения были зарегистрированы в тканях ***яичек.***

Так, сильно деформированные семенные канальцы с потерей клеточной структуры и зоной воспалительных изменений, сильно деформированный придаток яичка с потерей клеточной структуры и полным отсутствием сперматозоидов, что может привести к низкой фертильности, выявлены у крыс, которые находились на расстоянии 24 м от мачт телекоммуникационной сети (1800 МГц) в течение 5 недель [37].

При воздействии ЭМП РЧ 900 МГц (1 ч/сут в течение 30 дней) на самцов крыс были зарегистрированы вакуоли в базальной мембране семенных канальцев и отек в межканальцевом пространстве, диаметры самих семенных канальцев и толщина зародышевого эпителия уменьшены, а индекс апоптоза был выше [38].

M. Saygin et al. зарегистрировали снижение количество клеток Лейдига, дегенерацию клеток яичек и апоптоз в ткани яичек крыс при воздействии 2,45 ГГц (60 мин/сут в течение 28 дней) [39]. P. Chauhan et al., применяя длительное воздействие ЭМП РЧ (2,45 ГГц, 2 ч/сут в течение 35 дней), выявили дегенерацию эпителия эпидидимиса и некроз семенных трубочек, окклюзию просвета, уменьшение размера семенных каналов [36].

Особого внимания, на наш взгляд, заслуживают исследования воздействия Wi-Fi (2,24 ГГц, 1 ч/сут и 7 ч/сут в течение 2 месяцев). Зарегистрировано увеличение количества апоптоз-положительных клеток, более выраженное при ежедневном воздействии в течение 7 ч/сут. Кроме того, при длительности воздействия 1 ч/сут сохранилась нормальная архитектура семенных канальцев и интерстициальная ткань, герминативный эпителий яичек был неповрежденным. Напротив, 7-часовая группа вызвала значительное снижение как количества слоев зародышевых клеток, так и среднего балла яичек [40].

Гистопатологические изменения в яичниках самок крыс выявлены при воздействии 1800 МГц (2 ч/сут в течение 30 и 60 дней соответственно). Через 30 дней выявлен застой и уменьшение количества фолликулов в яичниках, через 60 дней еще и дегенерация клеток преовуляторного фолликула и инфильтрация макрофагов, а также активируется вакуолизация интерстициальных клеток и слоев клеток гранулезы [41].

На основании вышеизложенного можно констатировать, что воздействие ЭМП РЧ различных частотных диапазонов вызывает существенные гистопатологические изменения в тканях яичек и яичников. На наш взгляд, это заслуживает особого внимания, поскольку в настоящее время многие носят (очень часто дети и подростки) мобильные телефоны / смартфоны в карманах брюк.

Единственное исследование, указывающее на негативное влияние ЭМП РЧ на целый ряд органов и тканей, в том числе и на ***поджелудочную железу***, – это работа H. Bhargav et al., в которой ***для 61 подростка*** (средний возраст 17,40 ± 0,24 года) с помощью метода электрофотонной визуализации после 15-минутного воздействия мобильного телефона на правое ухо было зарегистрировано статистически значимое снижение тонких энергетических уровней [12].

Выводы. Подводя итоги, можно сказать, что в большинстве исследований наблюдались не только функциональные, но и разнообразные гистопатологические изменения в органах, тканях и их клетках желез секреции. Мы полагаем, что приведенные результаты исследований влияния ЭМП РЧ различных частотных диапазонов на железы внешней, внутренней и смешанной секреции убедительно доказывают их негативное влияние, в том числе на детей и подростков.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН (44.1 гос. № темы 0084-2019-004).

Конфликт интересов. Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Данная публикация посвящена памяти выдающегося советского, российского ученого, крупнейшего специалиста в области радиобиологии, доктора медицинских наук, профессора, президента Российского национального комитета по защите от неионизирующей радиации (РНКЗНИ), постоянного члена консультативного Комитета ВОЗ по Международной программе «Электромагнитные поля и здоровье населения» Юрия Григорьевича Григорьева.

Список литературы

1. Хорсева Н.И., Григорьев П.Е. Эффекты воздействий радиочастотных электромагнитных полей на нервную систему. Эксперименты in vivo (обзор) // Журнал медико-биологических исследований. – 2024. – Т. 12, № 3. – С 383–398. DOI: 10.37482/2687-1491-Z195

2. Cellular phone use and risk of benign and malignant parotid gland tumors – a nationwide case-control study / S. Sadetzki, A. Chetrit, A. Jarus-Hakak, E. Cardis, Y. Deutch, S. Duvdevani, A. Zultan, I. Novikov [et al.] // Am. J. Epidemiol. – 2008. – Vol. 167, № 4. – P. 457–467. DOI: 10.1093/aje/kwm325

3. Does Radiofrequency Radiation From Mobile Phones Affect the Formation of Parotid Gland Malignancy? An Experimental Study / Z. Ozergin Coskun, L. Tumkaya, A. Yilmaz, E. Dursun, T. Mercantepe, Y. Kalkan, S. Ersoz // Ear Nose Throat J. – 2024. – Vol. 103, Suppl. 3. – P. 75S–82S. DOI: 10.1177/01455613241287295

4. The effect of 2100 MHz radiofrequency radiation of a 3G mobile phone on the parotid gland of rats / F. Aydogan, I. Unlu, E. Aydin, N. Yumusak, E. Devrim, E.E. Samim, E. Ozgur, V. Unsal [et al.] // Am. J. Otolaryngol. – 2015. – Vol. 36, № 1. – P. 39–46. DOI: 10.1016/j.amjoto.2014.10.001

5. Effect of electromagnetic radiations from mobile phone base stations on general health and salivary function / K. Singh, A. Nagaraj, A. Yousuf, S. Ganta, S. Pareek, P. Vishnani // J. Int. Soc. Prev. Community Dent. – 2016. – Vol. 6, № 1. – P. 54–59. DOI: 10.4103/2231-0762.175413

6. Григорьев Ю.Г., Самойлов А.С. 5G-стандарт сотовой связи. Суммарная радиобиологическая оценка опасности воздействия планетарного электромагнитного излучения на население. – М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2021. – 200 с.

7. 5G mobile networks and health-a state-of-the-science review of the research into low-level RF fields above 6 GHz / K. Karipidis, R. Mate, D. Urban, R. Tinker, A. Wood // J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol. – 2021. – Vol. 31, № 4. – P. 585–605. DOI: 10.1038/s41370-021-00297-6

8. Comment on "5G mobile networks and health-a state-of-the-science review of the research into low-level RF fields above 6 GHz" by Karipidis et al / S. Weller, M. May, J. McCredden, V. Leach, D. Phung, I. Belyaev // J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol. – 2023. – Vol. 33, № 1. – P. 17–20. DOI: 10.1038/s41370-022-00497-8

9. Morphology of human sweat ducts observed by optical coherence tomography and their frequency of resonance in the terahertz frequency region / S.R. Tripathi, E. Miyata, P.B. Ishai, K. Kawase // Sci. Rep. – 2015. – Vol. 5. – P. 9071. DOI: 10.1038/srep09071

10. Betzalel N., Ben Ishai P., Feldman Y. The human skin as a sub-THz receiver – Does 5G pose a danger to it or not? // Environ. Res. – 2018. – Vol. 163. – P. 208–216. DOI: 10.1016/j.envres.2018.01.032

11. Ященко С.Г., Рыбалко С.Ю. Морфологическая структура эпифиза крыс при воздействии электромагнитных излучений коммуникационных устройств // Гигиена и санитария. – 2016. – Т. 95, № 10. – С. 977–979. DOI: 10.18821/0016-9900-2016-95-10-977-979

12. Acute effects of mobile phone radiations on subtle energy levels of teenagers using electrophotonic imaging technique: A randomized controlled study / H. Bhargav, T.M. Srinivasan, S. Bista, A. Mooventhan, V. Suresh, A. Hankey, H.R. Nagendra // Int. J. Yoga. – 2017. – Vol. 10, № 1. – P. 16–23. DOI: 10.4103/0973-6131.186163

13. Григорьев Ю.Г., Воронцова З.А., Ушаков И.Б. Оценка опасности воздействия электромагнтных полей на морфофункциональное состояние щитовидной железы // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2020. – Т. 60, № 6. – С. 622–626. DOI: 10.31857/S0869803120050112

14. Григорьев Ю.Г., Хорсева Н.И., Григорьев П.Е. Щитовидная железа – новый критический орган воздействия электромагнитных полей мобильной связи: оценка возможных последствий для детей и подростков // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 67–75.

15. The possible global hazard of cell phone radiation on thyroid cells and hormones: a systematic review of evidences / J.F. Asl, B. Larijani, M. Zakerkish, F. Rahim, K. Shirbandi, R. Akbari // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. – 2019. – Vol. 26, № 18. – P. 18017–18031. DOI: 10.1007/s11356-019-05096-z

16. An Exploration of the Effects of Radiofrequency Radiation Emitted by Mobile Phones and Extremely Low Frequency Radiation on Thyroid Hormones and Thyroid Gland Histopathology / T. Alkayyali, O. Ochuba, K. Srivastava, J.K. Sandhu, C. Joseph, S.W. Ruo, A. Jain, A. Waqar, S. Poudel // Cureus. – 2021. – Vol. 13, № 8. – P. e17329. DOI: 10.7759/cureus.17329

17. Hajioun B., Jowhari H., Mokhtari M. Effects of cell phone radiation on the levels of T3, T4 and TSH, and histological changes in thyroid gland in rats treated with Allium sativum extract // Afr. J. Biotechnol. – 2014. – Vol. 13, № 1. – P. 163–169. DOI: 10.5897/AJB2013.12471

18. Eşmekaya M.A., Seyhan N., Ömeroğlu S. Pulse modulated 900 MHz radiation induces hypothyroidism and apoptosis in thyroid cells: a light, electron microscopy and immunohistochemical study // Int. J. Radiat. Biol. – 2010. – Vol. 86, № 12. – P. 1106–1116. DOI: 10.3109/09553002.2010.502960

19. Shaukat F., Qamar K., Ahmed Butt S. Effects of mobile phone induced electromagnetic field on height of follicular cells in thyroid gland of mice // J. Rawalpindi Med. Coll. – 2011. – Vol. 15, № 1. – P. 27–29.

20. Exposure to non-ionizing radiation provokes changes in rat thyroid morphology and expression of HSP-90 / M.J. Misa-Agustiño, T. Jorge-Mora, F.J. Jorge-Barreiro, J. Suarez-Quintanilla, E. Moreno-Piquero, F.J. Ares-Pena, E. López-Martín // Exp. Biol. Med. (Maywood). – 2015. – Vol. 240, № 9. – P. 1123–1135. DOI: 10.1177/1535370214567611

21. Eskander E.F., Estefan S.F., Abd-Rabou A.A. How does long term exposure to base stations and mobile phones affect human hormone profiles? // Clin. Biochem. – 2012. – Vol. 45, № 1–2. – P. 157–161. DOI: 10.1016/j.clinbiochem.2011.11.006

22. Alterations in TSH and Thyroid Hormones following Mobile Phone Use / S. Mortavazi, A. Habib, A. Ganj-Karami, R. Samimi-Doost, A. Pour-Abedi, A. Babaie // Oman Med. J. – 2009. – Vol. 24, № 4. – P. 274–278. DOI: 10.5001/omj.2009.56

23. Baby N.M., Koshy G., Mathew A. The effect of electromagnetic radiation due to mobile phone use on thyroid fun3ction in medical students studying in a medical college in South India // Indian J. Endocrinol. Metab. – 2017. – Vol. 21, № 6. – P. 797–802. DOI: 10.4103/ijem.IJEM_12_17

24. Elsayed N.M., Jastaniah S.D. Mobile phone use and risk of thyroid gland lesions detected by ultrasonography // Open Journal of Radiology. – 2016. – Vol. 6, № 2. – P. 140–146. DOI: 10.4236/ojrad.2016.62021

25. Современные представления о морфологии тимуса / Д.В. Бреусенко, И.Д. Димов, Е.С. Клименко, Н.Р. Карелина // Педиатр. – 2017. – Т. 8, № 5. – С. 91–95. DOI: 10.17816/PED8591-95

26. Alterations of thymic morphology and antioxidant biomarkers in 60-day-old male rats following exposure to a continuous 900 MHz electromagnetic field during adolescence / A. Kulaber, G. Kerimoğlu, Ş. Ersöz, S. Çolakoğlu, E. Odacı // Biotech. Histochem. – 2017. – Vol. 92, № 5. – P. 331–337. DOI: 10.1080/10520295.2017.1312525

27. Can 900 MHz and 2100 MHz radiofrequency radiation exposure induce endoplasmic reticulum stress and apoptosis in rat thymus? / E. Kaya, E. Kırımlıoğlu, H. Er, A. Okan Oflamaz, Ş. Özen, N. Demir // Eur. Res. J. – 2023. – Vol. 9, № 1. – P. 29–38. DOI: 10.18621/eurj.1049381

28. EMF radiation at 2450 MHz triggers changes in the morphology and expression of heat shock proteins and glucocorticoid receptors in rat thymus / M.J. Misa-Agustiño, J.M. Leiro-Vidal, J.L. Gomez-Amoza, M.T. Jorge-Mora, F.J. Jorge-Barreiro, A.A. Salas-Sánchez, F.J. Ares-Pena, E. López-Martín // Life Sci. – 2015. – Vol. 127. – P. 1–11. DOI: 10.1016/j.lfs.2015.01.027

29. Does omega-3 have a protective effect on the rat adrenal gland exposed to 900 MHz electromagnetic fields? / A. Kocaman, M. Gül, K.K. Yurt, G. Altun, E. Zayman, E.G. Kıvrak // J. Microsc. Ultrastruct. – 2017. – Vol. 5, № 4. – P. 185–190. DOI: 10.1016/j.jmau.2017.08.003

30. Exposure to cell phone radiofrequency changes corticotrophin hormone levels and histology of the brain and adrenal glands in male Wistar rat / S. Shahabi, I. Hassanzadeh Taji, M. Hoseinnezhaddarzi, F. Mousavi, S. Shirchi, A. Nazari, H. Zarei, F. Pourabdolhossein // Iran. J. Basic Med. Sci. – 2018. – Vol. 21, № 12. – P. 1269–1274. DOI: 10.22038/ijbms.2018.29567.7133

31. Pathological changes associated with experimental 900-MHz electromagnetic wave exposure in rats / M. Sepehrimanesh, N. Azarpira, M. Saeb, S. Nazifi, N. Kazemipour, O. Koohi // Comp. Clin. Path. – 2014. – Vol. 23. – P. 1629–1631. DOI: 10.1007/s00580-013-1835-0

32. Impacts of exposure to 900 MHz mobile phone radiation on liver function in rats / H.R. Ma, Z.H. Ma, G.Y. Wang, C.M. Song, X.L. Ma, X.H. Cao, G.H. Zhang // Zhongguo Ying Yong Sheng Li Xue Za Zhi. – 2015. – Vol. 31, № 6. – P. 567–571.

33. Okatan D.Ö., Kulaber A., Kerimoglu G., Odacı E. Altered morphology and biochemistry of the female rat liver following 900 megahertz electromagnetic field exposure during mid to late adolescence // Biotech. Histochem. – 2019. – Vol. 94, № 6. – P. 420–428. DOI: 10.1080/10520295.2019.1580767

34. A technical report on the effect of electromagnetic radiation from a mobile phone on mice organs / B. Al-Glaib, M. Al-Dardfi, A. Al-Tuhami, A. Elgenaidi, M. Dkhil // Libyan J. Med. – 2008. – Vol. 3, № 1. – P. 8–9. DOI: 10.4176/080107

35. Structural and ultrastructural study of rat liver influenced by electromagnetic radiation / K. Holovská, V. Almášiová, V. Cigánková, K. Beňová, E. Račeková, M. Martončíková // J. Toxicol. Environ. Health A. – 2015. – Vol. 78, № 6. – P. 353–356. DOI: 10.1080/15287394.2014.979272

36. Microwave radiation (2.45 GHz) -induced oxidative stress: Whole-body exposure effect on histopathology of Wistar rats / P. Chauhan, H.N. Verma, R. Sisodia, K.K. Kesari // Electromagn. Biol. Med. – 2016. – Vol. 36, № 1. – P. 20–30. DOI: 10.3109/15368378.2016.1144063

37. Bio-physical effects of radiofrequency electromagnetic radiation (RF-EMR) on blood parameters, spermatozoa, liver, kidney and heart of albino rats / E.A. Adebayo, A.O. Adeeyo, M.A. Ogundiran, O. Olabisi // J. King Saud Univ. Sci. – 2019. – Vol. 31, № 4. – P. 813–821. DOI: 10.1016/j.jksus.2018.11.007

38. Odacı E., Özyılmaz C. Exposure to a 900 MHz electromagnetic field for 1 hour a day over 30 days does change the histopathology and biochemistry of the rat testis // Int. J. Radiat. Biol. – 2015. – Vol. 91, № 7. – P. 547–554. DOI: 10.3109/09553002.2015.1031850

39. Testicular apoptosis and histopathological changes induced by a 2.45 GHz electromagnetic field / M. Saygin, S. Caliskan, N. Karahan, A. Koyu, N. Gumral, A. Uguz // Toxicol. Ind. Health. – 2011. – Vol. 27, № 5. – P. 455–463. DOI: 10.1177/0748233710389851

40. Effects of Wi-Fi (2.45 GHz) Exposure on Apoptosis, Sperm Parameters and Testicular Histomorphometry in Rats: A Time Course Study / S. Shokri, A. Soltani, M. Kazemi, D. Sardari, F.B. Mofrad // Cell J. – 2015. – Vol. 17, № 2. – P. 322–331. DOI: 10.22074/cellj.2016.3740

41. Histopathological changes associated with oxidative stress induced by electromagnetic waves in rats' ovarian and uterine tissues / A.S.H. Alchalabi, H. Rahim, E. Aklilu, I.I. Al-Sultan, A.R. Aziz, M.F. Malek, S.H. Ronald, M.A. Khan // Asian Pac. J. Reprod. – 2016. – Vol. 5, № 4. – P. 301–310. DOI: 10.1016/j.apjr.2016.06.008

Хорсева Н.И., Григорьев П.Е. Системные эффекты радиочастотных электромагнитных полей (обзор). Часть 1. Железы секреции // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 2. – С. 175–184. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.15

UDC 57.042+57.049+ 612.1+614
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.15.eng

Read online

Review

SYSTEMIC EFFECTS OF RADIOFREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS (REVIEW). PART 1. SECRETION GLANDS

N.I. Khorseva[1], P.E. Grigoriev[2,3]

[1]Institute of Biochemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 4 Kosygina St., Moscow, 119334, Russian Federation
[2]Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation
[3]Academic Research Institute of Physical Methods of Treatment, Medical Climatology and Rehabilitation named after I.M. Sechenov, 10/3 Mukhina St., Yalta, Republic of Crimea, 298603, Russian Federation

Among publications on systemic effects of radio frequency electromagnetic fields (RF EMF), primarily those inherent in cellular communication devices (most often from 900 MHz to 2.5 GHz), as well as Wi-Fi, special attention should be paid to their influence on structural changes in the secretory glands, which are often direct targets for the impact of the corresponding RF EMF (for example, the thyroid gland).

Various pathohistological effects of chronic exposure to RF EMF in different modes on the glands of external secretion have been established both in experimental studies on animals and in epidemiological ones. The parotid gland, salivary glands, sweat glands are among those mentioned in them.

The endocrine glands can also be affected by RF EMF, which is confirmed by the results of numerous studies on the pineal gland, pituitary gland, thyroid gland, and adrenal glands, in which changes in their structure and functions have been recorded in both experimental animals and humans. At the same time, there is fairly pronounced dependence between resulting effects and exposure and other characteristics of RF EMF.

At present, biological effects of RF EMF produced by various frequency ranges (cellular devices and telecommunication masts) have been reliably established. Various histopathological changes have been registered in the glands of mixed secretion such as the liver, pancreas, testicles and ovaries. Serious disorders in the testicles and ovaries revealed in experimental animals are particularly relevant since they undoubtedly lead to reproductive dysfunction.

Particular concern is raised by the fact that cellular users of different ages, primarily children and adolescents, carry mobile devices in their trouser pockets, i.e. in close proximity to the sex glands.

The present period is also characterized by accumulation of comparative epidemiological data as well as non-invasive measurements of structural and functional changes in the secretory glands in humans. Based on them, an unambiguous conclusion should be made about the need to limit and take precautions when using cellular devices, which is also indicated by some of the works considered in this review.

Keywords: *electromagnetic fields of the radio frequency range, cellular devices, Wi-Fi, endocrine glands, exocrine glands, mixed secretion glands, histological changes, young animals.*

References

1. Khorseva N.I., Grigoriev P.E. Effects of Radio Frequency Electromagnetic Fields on the Nervous System. In vivo Experiments (Review). *Zhurnal mediko-biologicheskikh issledovanii*, 2024, vol. 12, no. 3, pp. 383–398. DOI: 10.37482/2687-1491-Z195 (in Russian).

2. Sadetzki S., Chetrit A., Jarus-Hakak A., Cardis E., Deutch Y., Duvdevani S., Zultan A., Novikov I. [et al.]. Cellular phone use and risk of benign and malignant parotid gland tumors – a nationwide case-control study. *Am. J. Epidemiol.*, 2008, vol. 167, no. 4, pp. 457–467. DOI: 10.1093/aje/kwm325

3. Ozergin Coskun Z., Tumkaya L., Yilmaz A., Dursun E., Mercantepe T., Kalkan Y., Ersoz S. Does Radiofrequency Radiation From Mobile Phones Affect the Formation of Parotid Gland Malignancy? An Experimental Study. *Ear Nose Throat J.*, 2024, vol. 103, suppl. 3, pp. 75S–82S. DOI: 10.1177/01455613241287295

© Khorseva N.I., Grigoriev P.E., 2025

Natalia I. Khorseva – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Physical and Chemical Problems of Radiobiology and Ecology (e-mail: sheridan1957@mail.ru; tel.: +7 (905) 782-87-17; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3444-0050).

Pavel E. Grigoriev – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Psychology; Leading Researcher of the Research Department of Physiotherapy, Medical Climatology and Resort Factors (e-mail: mhnty@ya.ru; tel.: +7 (978) 767-22-10; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7390-9109).

4. Aydogan F., Unlu I., Aydin E., Yumusak N., Devrim E., Samim E.E., Ozgur E., Unsal V. [et al.]. The effect of 2100 MHz radiofrequency radiation of a 3G mobile phone on the parotid gland of rats. *Am. J. Otolaryngol*., 2015, vol. 36, no. 1, pp. 39–46. DOI: 10.1016/j.amjoto.2014.10.001

5. Singh K., Nagaraj A., Yousuf A., Ganta S., Pareek S., Vishnani P. Effect of electromagnetic radiations from mobile phone base stations on general health and salivary function. *J. Int. Soc. Prev. Community Dent*., 2016, vol. 6, no. 1, pp. 54–59. DOI: 10.4103/2231-0762.175413

6. Grigoriev Yu.G., Samoylov A.S. 5G-cellular standards. Total radiobiological assessment of the danger of planetary electromagnetic radiation exposure to the population. Moscow, SRC – FMBC Publ., 2020 (in Russian).

7. Karipidis K., Mate R., Urban D., Tinker R., Wood A. 5G mobile networks and health-a state-of-the-science review of the research into low-level RF fields above 6 GHz. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol*., 2021, vol. 31, no. 4, pp. 585–605. DOI: 10.1038/s41370-021-00297-6

8. Weller S., May M., McCredden J., Leach V., Phung D., Belyaev I. Comment on "5G mobile networks and health-a state-of-the-science review of the research into low-level RF fields above 6 GHz" by Karipidis et al. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol*., 2023, vol. 33, no. 1, pp. 17–20. DOI: 10.1038/s41370-022-00497-8

9. Tripathi S.R., Miyata E., Ishai P.B., Kawase K. Morphology of human sweat ducts observed by optical coherence tomography and their frequency of resonance in the terahertz frequency region. *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, pp. 9071. DOI: 10.1038/srep09071

10. Betzalel N., Ben Ishai P., Feldman Y. The human skin as a sub-THz receiver – Does 5G pose a danger to it or not? *Environ. Res.*, 2018, vol. 163, pp. 208–216. DOI: 10.1016/j.envres.2018.01.032

11. Yashchenko S.G., Rybalko S.Yu. Morphological structure of rat epiphysis exposed to electromagnetic radiation from communication devices. *Gigiena i sanitariya*, 2016, vol. 95, no. 10, pp. 977–979. DOI: 10.18821/0016-9900-2016-95-10-977-979 (in Russian).

12. Bhargav H., Srinivasan T.M., Bista S., Mooventhan A., Suresh V., Hankey A., Nagendra H.R. Acute effects of mobile phone radiations on subtle energy levels of teenagers using electrophotonic imaging technique: A randomized controlled study. *Int. J. Yoga*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 16–23. DOI: 10.4103/0973-6131.186163

13. Grigoryev Yu.G., Vorontsova Z.A., Ushakov I.B. Evaluation of the Hazards of Electromagnetic Fields on the Morphofunctional Condition of the Thyroid Gland. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 2020, vol. 60, no. 6, pp. 622–626. DOI: 10.31857/S0869803120050112 (in Russian).

14. Grigor'ev Yu.G., Horseva N.I., Grigor'ev P.E. The Thyroid – a New Critical Body for Impacting Electromagnetic Fields Mobile Communications: Assessment of Possible Effects for Children and Adolescents. *Medical Radiology and Radiation Safety*, 2021, vol. 66, no. 2, pp. 67–75 (in Russian).

15. Asl J.F., Larijani B., Zakerkish M., Rahim F., Shirbandi K., Akbari R. The possible global hazard of cell phone radiation on thyroid cells and hormones: a systematic review of evidences. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int*., 2019, vol. 26, no. 18, pp. 18017–18031. DOI: 10.1007/s11356-019-05096-z

16. Alkayyali T., Ochuba O., Srivastava K., Sandhu J.K., Joseph C., Ruo S.W., Jain A., Waqar A., Poudel S. An Exploration of the Effects of Radiofrequency Radiation Emitted by Mobile Phones and Extremely Low Frequency Radiation on Thyroid Hormones and Thyroid Gland. *Histopathology. Cureus*, 2021, vol. 13, no. 8, pp. e17329.

17. Hajioun B., Jowhari H., Mokhtari M. Effects of cell phone radiation on the levels of T3, T4 and TSH, and histological changes in thyroid gland in rats treated with Allium sativum extract. *Afr. J. Biotechnol*., 2014, vol. 13, no. 1, pp. 163–169. DOI: 10.5897/AJB2013.12471

18. Eşmekaya M.A., Seyhan N., Ömeroğlu S. Pulse modulated 900 MHz radiation induces hypothyroidism and apoptosis in thyroid cells: a light, electron microscopy and immunohistochemical study. *Int. J. Radiat. Biol*., 2010, vol. 86, no. 12, pp. 1106–1116. DOI: 10.3109/09553002.2010.502960

19. Shaukat F., Qamar K., Ahmed Butt S. Effects of mobile phone induced electromagnetic field on height of follicular cells in thyroid gland of mice. *J. Rawalpindi Med. Coll*., 2011, vol. 15, no. 1, pp. 27–29.

20. Misa-Agustiño M.J., Jorge-Mora T., Jorge-Barreiro F.J., Suarez-Quintanilla J., Moreno-Piquero E., Ares-Pena F.J., López-Martín E. Exposure to non-ionizing radiation provokes changes in rat thyroid morphology and expression of HSP-90. *Exp. Biol. Med. (Maywood)*, 2015, vol. 240, no. 9, pp. 1123–1135. DOI: 10.1177/1535370214567611

21. Eskander E.F., Estefan S.F., Abd-Rabou A.A. How does long term exposure to base stations and mobile phones affect human hormone profiles? *Clin. Biochem.*, 2012, vol. 45, no. 1–2, pp. 157–161. DOI: 10.1016/j.clinbiochem.2011.11.006

22. Mortavazi S., Habib A., Ganj-Karami A., Samimi-Doost R., Pour-Abedi A., Babaie A. Alterations in TSH and Thyroid Hormones following Mobile Phone Use. *Oman Med. J*., 2009, vol. 24, no. 4, pp. 274–278. DOI: 10.5001/omj.2009.56

23. Baby N.M., Koshy G., Mathew A. The effect of electromagnetic radiation due to mobile phone use on thyroid fun3ction in medical students studying in a medical college in South India. *Indian J. Endocrinol. Metab.*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 797–802. DOI: 10.4103/ijem.IJEM_12_17

24. Elsayed N.M., Jastaniah S.D. Mobile phone use and risk of thyroid gland lesions detected by ultrasonography. *Open Journal of Radiology*, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 140–146. DOI: 10.4236/ojrad.2016.62021

25. Breusenko D.V., Dimov I.D., Klimenko E.S., Karelina N.R. Modern concepts of thymus morphology. *Pediatr*, 2017, vol. 8, no. 5, pp. 91–95. DOI: 10.17816/PED8591-95 (in Russian).

26. Kulaber A., Kerimoğlu G., Ersöz Ş., Çolakoğlu S., Odacı E. Alterations of thymic morphology and antioxidant biomarkers in 60-day-old male rats following exposure to a continuous 900 MHz electromagnetic field during adolescence. *Biotech. Histochem.*, 2017, vol. 92, no. 5, pp. 331–337. DOI: 10.1080/10520295.2017.1312525

27. Kaya E., Kırımlıoğlu E., Er H., Okan Oflamaz A., Özen Ş., Demir N. Can 900 MHz and 2100 MHz radiofrequency radiation exposure induce endoplasmic reticulum stress and apoptosis in rat thymus? *Eur. Res. J*., 2023, vol. 9, no. 1, pp. 29–38. DOI: 10.18621/eurj.1049381

28. Misa-Agustiño M.J., Leiro-Vidal J.M., Gomez-Amoza J.L., Jorge-Mora M.T., Jorge-Barreiro F.J., Salas-Sánchez A.A., Ares-Pena F.J., López-Martín E. EMF radiation at 2450 MHz triggers changes in the morphology and expression of heat shock proteins and glucocorticoid receptors in rat thymus. *Life Sci.*, 2015, vol. 127, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.lfs.2015.01.027

29. Kocaman A., Gül M., Yurt K.K., Altun G., Zayman E., Kıvrak E.G. Does omega-3 have a protective effect on the rat adrenal gland exposed to 900 MHz electromagnetic fields? *J. Microsc. Ultrastruct.*, 2017, vol. 5, no. 4, pp. 185–190. DOI: 10.1016/j.jmau.2017.08.003

30. Shahabi S., Hassanzadeh Taji I., Hoseinnezhaddarzi M., Mousavi F., Shirchi S., Nazari A., Zarei H., Pourabdolhossein F. Exposure to cell phone radiofrequency changes corticotrophin hormone levels and histology of the brain and adrenal glands in male Wistar rat. *Iran. J. Basic Med. Sci.*, 2018, vol. 21, no. 12, pp. 1269–1274. DOI: 10.22038/ijbms.2018.29567.7133

31. Sepehrimanesh M., Azarpira N., Saeb M., Nazifi S., Kazemipour N., Koohi O. Pathological changes associated with experimental 900-MHz electromagnetic wave exposure in rats. *Comp. Clin. Path.*, 2014, vol. 23, pp. 1629–1631. DOI: 10.1007/s00580-013-1835-0

32. Ma H.R., Ma Z.H., Wang G.Y., Song C.M., Ma X.L., Cao X.H., Zhang G.H. Impacts of exposure to 900 MHz mobile phone radiation on liver function in rats. *Zhongguo Ying Yong Sheng Li Xue Za Zhi*, 2015, vol. 31, no. 6, pp. 567–571.

33. Okatan D.Ö., Kulaber A., Kerimoglu G., Odacı E. Altered morphology and biochemistry of the female rat liver following 900 megahertz electromagnetic field exposure during mid to late adolescence. *Biotech. Histochem.*, 2019, vol. 94, no. 6, pp. 420–428. DOI: 10.1080/10520295.2019.1580767

34. Al-Glaib B., Al-Dardfi M., Al-Tuhami A., Elgenaidi A., Dkhil M. A technical report on the effect of electromagnetic radiation from a mobile phone on mice organs. *Libyan J. Med.*, 2008, vol. 3, no. 1, pp. 8–9. DOI: 10.4176/080107

35. Holovská K., Almášiová V., Cigánková V., Beňová K., Račeková E., Martončíková M. Structural and ultrastructural study of rat liver influenced by electromagnetic radiation. *J. Toxicol. Environ. Health A*, 2015, vol. 78, no. 6, pp. 353–356. DOI: 10.1080/15287394.2014.979272

36. Chauhan P., Verma H.N., Sisodia R., Kesari K.K. Microwave radiation (2.45 GHz)-induced oxidative stress: Whole-body exposure effect on histopathology of Wistar rats. *Electromagn. Biol. Med.*, 2016, vol. 36, no. 1, pp. 20–30. DOI: 10.3109/15368378.2016.1144063

37. Adebayo E.A., Adeeyo A.O., Ogundiran M.A., Olabisi O. Bio-physical effects of radiofrequency electromagnetic radiation (RF-EMR) on blood parameters, spermatozoa, liver, kidney and heart of albino rats. *J. King Saud Univ. – Sci.*, 2019, vol. 31, no. 4, pp. 813–821. DOI: 10.1016/j.jksus.2018.11.007

38. Odacı E., Özyılmaz C. Exposure to a 900 MHz electromagnetic field for 1 hour a day over 30 days does change the histopathology and biochemistry of the rat testis. *Int. J. Radiat. Biol.*, 2015, vol. 91, no. 7, pp. 547–554. DOI: 10.3109/09553002.2015.1031850

39. Saygin M., Caliskan S., Karahan N., Koyu A., Gumral N., Uguz A. Testicular apoptosis and histopathological changes induced by a 2.45 GHz electromagnetic field. *Toxicol. Ind. Health*, 2011, vol. 27, no. 5, pp. 455–463. DOI: 10.1177/0748233710389851

40. Shokri S., Soltani A., Kazemi M., Sardari D., Mofrad F.B. Effects of Wi-Fi (2.45 GHz) Exposure on Apoptosis, Sperm Parameters and Testicular Histomorphometry in Rats: A Time Course Study. *Cell J.*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 322–331. DOI: 10.22074/cellj.2016.3740

41. Alchalabi A.S.H., Rahim H., Aklilu E., Al-Sultan I.I., Aziz A.R., Malek M.F., Ronald S.H., Khan M.A. Histopathological changes associated with oxidative stress induced by electromagnetic waves in rats' ovarian and uterine tissues. *Asian Pac. J. Reprod.*, 2016, vol. 5, no. 4, pp. 301–310. DOI: 10.1016/j.apjr.2016.06.008

Khorseva N.I., Grigoriev P.E. Systemic effects of radiofrequency electromagnetic fields (review). Part 1. Secretion glands. Health Risk Analysis, 2025, no. 2, pp. 175–184. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.15.eng

Получена: 06.03.2025
Одобрена: 25.04.2025
Принята к публикации: 14.06.2025

УДК 613.632.2; 615.916
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.16

Читать онлайн

Научный обзор

СОВРЕМЕННЫЕ ДАННЫЕ О ПУЛЬМОНО-, ГЕПАТО- И КАРДИОТОКСИЧНОСТИ НАНОЧАСТИЦ *IN VIVO* (ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР)

Н.А. Гертан[1], М.П. Сутункова[1,2], Л.В. Шабардина[1], Т.В. Махорина[1], К.М. Никогосян[1], Р.Ф. Минигалиева[1,3]

[1]Екатеринбургский медицинский – научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий, Российская Федерация, 620014, г. Екатеринбург, ул. Попова, 30
[2]Уральский государственный медицинский университет, Российская Федерация, 620028, г. Екатеринбург, ул. Репина, 2
[3]Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Российская Федерация, 620000, г. Екатеринбург, ул. Ленина, 51

Широкое применение наночастиц (НЧ) в различных отраслях промышленности, науки, медицины и косметологии, в сельском хозяйстве, а также их постоянное присутствие в окружающей среде обусловливают необходимость всестороннего изучения последствий воздействия НЧ на живые системы для прогнозирования рисков здоровья и разработки профилактических мероприятий. Осуществлены изучение и систематизация современных сведений о токсическом действии наночастиц на легкие, печень и сердце.

Поиск информации осуществлялся по российским (eLIBRARY.RU) и зарубежным (PubMed, Google Scholar) базам данных и электронным библиотекам за 2022–2024 гг. Статьи отбирались по принципу наличия в них сведений о влиянии на организм частиц размером от 1 до 100 нм. Критериями исключения были: исследования in vitro, in silico и эпидемиологические исследования. Проанализировано более 150 статей, отобрано 31 полнотекстовое исследование in vivo (включая один препринт) и 18 статей для описания выявленных эффектов.

Токсическое действие НЧ обусловлено их уникальными свойствами и зависит от химического состава, размера, формы, их концентрации, времени воздействия, способности преодолевать внутренние барьеры организма. Негативные эффекты, вызываемые НЧ, отмечаются на всех структурных уровнях организма. Преимущественно НЧ индуцируют воспалительные, дистрофические и некротические изменения. В качестве основных механизмов токсического действия можно выделить тесно связанные между собой воспаление и окислительный стресс.

Оценка и анализ массива экспериментальных исследований по изучению потенциальных рисков действия НЧ на различных структурных уровнях позволяют выявить малейшие изменения в органах с целью дальнейшей разработки системы профилактических мер, направленных на повышение устойчивости организма к таким НЧ-опосредованным патологическим эффектам.

Ключевые слова: *нанотоксичность, наночастицы, интоксикация, обзор, исследования in vivo, легкие, печень, сердце.*

Образующиеся в результате природных и в большей степени антропогенных процессов наночастицы (НЧ) поступают в организм через различные объекты среды обитания, в том числе воздух, воду, почву, продукты питания и косметические средства, или напрямую в результате медицинской деятельности (диагностика, лечение с использованием НЧ), в связи с чем экспозиция населения может происходить несколькими путями: ингаляционно, перорально, перкутанно или парентерально. Это приводит к развитию структурных и функциональных нарушений в организме человека, тем самым повышая риски здоровью

© Гертан Н.А., Сутункова М.П., Шабардина Л.В., Махорина Т.В., Никогосян К.М., Минигалиева Р.Ф., 2025

Гертан Наталья Александровна – младший научный сотрудник отдела токсикологии и биопрофилактики (e-mail: gertan00@mail.ru; тел.: 8 (343) 371-11-05; ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3239-5998).

Сутункова Марина Петровна – доктор медицинских наук, директор; заведующий кафедрой гигиены и медицины труда (e-mail: sutunkova@ymrc.ru; тел.: 8 (343) 371-20-87; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1743-7642).

Шабардина Лада Владимировна – младший научный сотрудник отдела токсикологии и биопрофилактики (e-mail: lada.shabardina@mail.ru; тел.: 8 (343) 371-11-05; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8284-0008).

Махорина Татьяна Владимировна – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник отдела токсикологии и биопрофилактики (e-mail: lisa430@yandex.ru; тел.: 8 (343) 214-11-31; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6126-9706).

Никогосян Карен Мерсопович – младший научный сотрудник отдела токсикологии и биопрофилактики (e-mail: nikoghosyankm@ymrc.ru; тел.: 8 (343) 371-20-87; ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0780-5733).

Минигалиева Регина Флюзовна – лаборант-исследователь отдела молекулярной биологии и электронной микроскопии (e-mail: regina.minigalieva@yandex.ru; тел.: 8 (343) 371-20-87; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0013-6111).

населения и создавая необходимость в принятии мер по предупреждению негативных эффектов. Риск развития заболеваний, вызванных НЧ, и степень их тяжести зависят от множества факторов: размер и миграционный потенциал [1–3], кумулятивные свойства [4–6], химический состав [7], способ синтеза (химический или биологический) [8, 9], изолированное или комбинированное действие НЧ [3, 10], их концентрация и продолжительность воздействия [4, 11].

Широкая распространенность НЧ и высокая биологическая активность, обусловливающая их серьезное токсическое действие на организм, диктуют необходимость анализа и систематизации последних данных о токсичности НЧ и особенностей патогенеза на разных уровнях организации жизни, что также необходимо для прогнозирования риска здоровью и дальнейшей разработки профилактических мер. В качестве изучаемых органов мы выбрали легкие, печень и сердце, так как они являются наиболее изученными из основных органов-мишеней воздействия НЧ, кроме того, НЧ-опосредованное нарушение их функционирования представляет серьезную угрозу для здоровья организма.

Цель исследования – изучение и систематизация современных сведений о токсическом действии наночастиц на легкие, печень и сердце.

Материалы и методы. Были применены информационно-аналитические методы, включающие анализ и обобщение современных научных работ. Поиск информации проводился на русском и английском языках в базах данных и научных электронных библиотеках – eLIBRARY.RU, PubMed, Google Scholar, по следующим ключевым словам: токсичность, наночастицы, пульмонотоксичность, кардиотоксичность, гепатотоксичность, *toxicity*, *nanoparticles*, *size*, *in vivo*. Изучены списки литературы включенных исследований с целью поиска дополнительных статей для данного обзора. Условиями выбора основных источников литературы были: сведения о частицах размером 1–100 нм различного химического состава, наличие или отсутствие токсического эффекта НЧ на органы, дата публикации не ранее 2022 г.. Критериями исключения были: исследования *in vitro, in silico* и эпидемиологические исследования, поскольку их результаты трудно экстраполировать на уровень целого организма. При поиске на eLIBRARY.RU из 392 статей отобрано 5, на PubMed из 9 источников отобран один, на Google Scholar из более 17 000 результатов отобрано 25 статей (включая один препринт) по критериям, указанным выше. Большинство исследований, включенных обзор, проведено в России, Египте, Китае и Иране, по одному – в Мексике, Великобритании, ОАЭ, Пакистане, Дании, Турции, Японии, США и Республике Корее. В обзор вошли исследования, направленные на изучение НЧ Ag – 11/43 (26 %), Si – 5/43 (12 %), Zn, Ti и Al – по 4/43 (9 %), Cu – 3/43 (7 %), Pb, Fe и Sn – по 2/43 (5 %), Ni, Au, Mo, Se, In и Co – по 1/43 (2 %).

Результаты и их обсуждение. В доступной нам литературе раскрыты разнообразные патологические проявления токсического действия НЧ при различных путях поступления: ингаляционном, интрахеальном, интраназальном, внутрибрюшинном, пероральном, внутривенном, а также через все тело. Токсические эффекты были поделены по выбранным органам и описаны от молекулярно-генетического до организменного уровней. Объектами для исследований *in vivo* служили теплокровные животные (крысы и мыши) и рыбы.

Пульмонотоксическое действие НЧ. Начиная с молекулярно-генетического уровня заметны изменения в бронхоальвеолярной лаважной жидкости (БАЛЖ) и крови. При воздействии НЧ In/Sn (1, 2, 3, 6 мг/кг м.т.) отмечалось увеличение уровней малонового диальдегида (МДА) и супероксиддисмутазы (СОД) в БАЛЖ [12], а НЧ $CoFe_2O_4$ (5 мг/кг м.т.), помимо повышения уровня МДА, вызывали снижение восстановленного глутатиона в гомогенизате легких [13]. Подобные изменения указывают на развитие окислительного стресса. Окислительный стресс тесно связан с воспалением [14], развитие которого индуцируют НЧ. Так, НЧ (Al 20 и 40 мг/кг м.т. и In/Sn 1,2, 3, 6 мг/кг м.т.) вызывали значительное повышение воспалительных цитокинов (IL-1β, IL-4, IL-5, IL-6, IL-10, IL-13 и фактора некроза опухоли альфа (TNF-α)) в БАЛЖ [12, 15]. В том числе изменения заметны и на генетическом уровне – под действием НЧ феррита кобальта ($CoFe_2O_4$) в дозах 0,5 и 5 мг/кг м.т. увеличилась экспрессия генов TNF-α и IL-1β и снизилась IL-10 и трансформирующего фактора роста бета-1 (TGF-1β) [13] – важного фиброгенного цитокина [16].

Под действием НЧ Al (1,70 мг/м^3) и In/Sn (1,2, 3, 6 мг/кг м.т.) в крови было зафиксировано повышение активности лактатдегидрогеназы (ЛДГ) [17], аспартатаминотрансферазы (АСТ) и гидроксипролина [12]. В БАЛЖ после воздействия НЧ Sn (162 мкг/мышь), Ti (162 мкг/мышь) и In/Sn (1,2, 3, 6 мг/кг м.т. крысы) отмечалось значительное повышение уровней общего белка [18] и ЛДГ [12], а после воздействия НЧ Pb (0,215 мг/м^3) в одном из наших предыдущих исследований наблюдалась незначительная тенденция к росту аланинаминотрансферазы (АЛТ), АСТ, гамма-глутамилтранспептидазы (ГГТП) и ЛДГ [19]. Известно, что ЛДГ и общий белок связаны с легочным повреждением, воспалением и проницаемостью аэрогематического барьера [1, 12, 20], ГГТП, являясь мембраносвязанным ферментом, участвует в окислительных процессах, а изменение АСТ и АЛТ в БАЛЖ может указывать на клеточное повреждение [19]. Прямое легочное повреждение и воспаление зачастую переходят в фибротические изменения, признаки которых можно обнаружить уже на молекулярно-генетическом уровне. Повышение гидроксипролина при экспозиции НЧ Si (6,0 мг/кг м.т.) указывает на отложение коллагена и развитие фиброза [21]. Кро-

ме того, наблюдается связь окислительного стресса и фиброза, что подтверждается выявленной положительной корреляцией гидроксипролина с МДА и оксидом азота (NO) и отрицательной – с глутатионом, СОД и каталазой [22, 23]. Важно заметить: с прогрессированием фиброза также коррелируют уровни интерлейкинов (IL): IL-1β [24], IL-4 [25], IL-13 [26], изменяющиеся под действием НЧ.

Изменения на молекулярно-генетическом уровне неизбежно приводят к изменениям на клеточном и тканевом уровнях. При исследовании клеточно-фагоцитарной активности дыхательных путей после воздействия НЧ Pb (0,215 мг/м^3), Cu (4 мг/м^3, 2,6 и 12 мкг/мышь), 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.) было обнаружено увеличение содержания нейтрофилов [2, 15, 18, 19], эозинофилов [15], альвеолярных макрофагов [2, 12, 15] и снижение моноцитов и лимфоцитов [2, 19], альвеолярных макрофагов в БАЛЖ [19]. В исследовании НЧ Si (3 мг/кг м.т. и 6 мг/кг м.т.) отмечалось повышение доли альвеолярных и интерстициальных макрофагов при снижении естественных киллеров (NK-клетки), нейтрофилов и моноцитов [21]. Колебания уровней фагоцитарных клеток можно объяснить перераспределением в тканях, повышенной активностью с последующим истощением и различными условиями проведения экспериментов. Изменение клеточно-фагоцитарной активности, снижение соотношения сегментоядерных нейтрофилов к альвеолярным макрофагам, наблюдаемые в исследованиях, являются показателями цитотоксического и воспалительного действия НЧ, а также свидетельствуют об активации иммунного ответа [2, 19]. К тому же, наблюдалось дозозависимое повышение индуцируемой синтетазы оксида азота (iNOS) и Cox-2 ($CoFe_2O_4$ 0,5 и 5 мг/кг м.т.) [13] – маркеров модуляции противовоспалительного ответа [16, 27], что также подтверждает активацию иммунной защиты в ответ на токсическое повреждение. Таким образом, к механизмам токсического действия НЧ можно добавить активацию иммунного ответа.

На тканевом и органном уровнях на гистологических препаратах в легких крыс после воздействия НЧ выявлены: эпителизация и пролиферация пневмоцитов 2-го типа, гиперемия (Si 900 мг/кг м.т./день) [28] и отек легких (Mo 1,84 мг/м^3, Cu 1,2–1,4 мг/м^3) [1, 2], коричневая пигментация макрофагов, очаги эмфиземы и экссудация эритроцитов в просвет альвеол, геморрагический инфаркт (Cu 1,2–1,4 мг/м^3, Al 1,70 мг/м^3) [2, 17], очаги воспаления интерстиция (Mo 1,84 мг/м^3, Cu 1,2–1,4 мг/м^3, Al 20, 40, 100 мг/кг м.т., $CoFe_2O_4$ 0,5 мг/кг м.т.) [1, 2, 12, 13, 15, 29]. Кроме того, при воздействии НЧ наблюдались изменения в виде отложения коллагена в легких, утолщения альвеолярной стенки (Si 3 и 6 мг/кг м.т. и In/Sn 1, 2, 3, 6 мг/кг м.т.) [12, 21], что в совокупности с изменением уровней МДА и воспалительных цитокинов подтверждает влияние НЧ на развитие фибротических изменений легких через воспалительное и окислительное повреждение.

Изменений на организменном уровне среди изучаемых статей обнаружено не было; также есть исследования, показывающие отсутствие существенных повреждений (Si 0,125 мг/кг м.т., Ag 200 мкг/кг м.т.)[1] [30]. Тем не менее наличие нарушений на остальных уровнях существенно повышает вероятность развития заболеваний легких и дыхательной системы в целом. Различия в результатах могут быть обусловлены рядом факторов: физико-химическими свойствами НЧ, вводимой дозой, способом и продолжительностью действия, методами детекции и видами экспериментальных животных.

Гепатотоксическое действие НЧ. Важным органом-мишенью для многих токсичных соединений является печень. Она осуществляет барьерную и депонирующую функции, что делает ее более уязвимой к повреждающему действию НЧ [4]. На молекулярно-генетическом уровне при воздействии НЧ Al (100 мг/кг м.т.), Si (500 мкг/кг м.т. и 1,5, 3,0, и 6,0 мг/кг м.т.), Ni (1, 20, 150 мг/кг м.т.), Ag (50 мг/кг м.т., 200 ppb и 5 мкг/кг м.т.), Ag+Zn (50 + 30 мг/кг м.т.), Fe (100 мг/кг м.т.) выявляли повышение активных форм кислорода (АФК) [7, 31–33], 8-оксо-7,8-дигидро-2'-дезоксигуанозина (8-OHdG) – основного продукта окисления ДНК [34], реагирующих с тиобарбитуровой кислотой веществ [31], оксида азота (NO) [35], МДА [7, 29, 32, 35–37], окисленного глутатиона [32] со снижением восстановленного глутатиона [32, 37], каталазы [29, 31, 35–37], пероксидазы [29, 31, 35, 36], СОД [29, 31, 35, 36] в печени. Другое исследование, наоборот, показало увеличение СОД и каталазы, что авторы объясняют активацией защитного механизма обратной связи [34]. Явно фиксируется дисбаланс между прооксидантами и антиоксидантами, который вызывает нарушение целостности клеточных мембран и повреждение ДНК [38]. Помимо окислительного стресса, в тканях печени индуцировался стресс эндоплазматического ретикулума (ЭПР). При воздействии НЧ Si (1,5, 3,0, и 6,0 мг/кг м.т.) наблюдался повышенный уровень белка, связывающего тяжелую цепь иммуноглобулина в печени. В этом же исследовании наблюдали аномалии ЭПР: расширение пространства ЭПР, отсоединение рибосом, нарушение целостности и структуры ЭПР [32].

Развитие воспаления в ответ на экспозицию НЧ (Ti 50 мг/кг м.т., Ag 50 мг/кг м.т. и 200 ppb, Ag+Zn 50 + 30 мг/кг м.т., Ni 1, 20, 150 мг/кг м.т.) сопровождалось изменением уровней воспалительных цитокинов: возросли TNF-α [7, 35, 37], IL-1β [7, 36, 37], IL-6 [7, 37] и снизились IL-10 [37]. К тому же

[1] Toxicity Study of Silica Nanoparticles Following 94-Day Repeated Oral Administration in Sprague Dawley Rats: preprint (Version 1) / X. Cao, B. Xie, M. Xu, J. Li, X. Dai, Y. Tian, J. Zhang, Y. Chen [et al.] // Research Square. – 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4531919/v1

при воздействии НЧ Al (1,70 мг/м^3, 100 мг/кг м.т.), Se (0,2 мг/кг м.т.), Si (250 мг/кг м.т., 500 мкг/кг м.т.), Ti (50 мг/кг м.т.), Ag (10 % м.т.), Ni (1, 20, 150 мг/кг м.т.) и Fe (100 мг/кг м.т.) зафиксировали повышение активности АЛТ [4, 7, 8, 17, 29, 31, 35–37], АСТ[2] [4, 7, 17, 29, 31, 35–37] и ЛДГ [36], увеличение содержания лизофосфатидилинозитолов [4] и прямого билирубина [17, 29], снижение концентрации щелочной фосфатазы (ЩФ) [4], сукцинатдегидрогеназы [4], уменьшение содержания желчной и гликохолевой кислот [4], альбумина [31, 35, 36], общего белка [36], креатинина [6] в сыворотке крови. По другим данным концентрации ЩФ [17, 29, 31, 36] и альбумина [11] повышались. Схожие изменения наблюдались в гомогенатах печени: значительное дозозависимое увеличение активности печеночных ЛДГ, АЛТ и АСТ (Si 1,5, 3,0, и 6,0 мг/кг м.т.) [32]. Повышенные значения трансаминаз и ЩФ в печени свидетельствуют о воспалении, дисфункции митохондрий гепатоцитов и окислительном или нитрозативном стрессе [31].

Характерным для токсического повреждения НЧ печени оказалось изменение липидного обмена. НЧ Si (1,5, 3,0, и 6,0 мг/кг м.т.) вызвали увеличение экспрессии уровней мРНК генов *Fasn*, *Elovl6* и *Scd1*, связанных с синтезом жирных кислот [32, 39, 40], снижение экспрессии генов *Cpt1a*, *Acox1* и *Ppara*, участвующих в бета-окислении жирных кислот [32, 41], *Scarb1*, *Abca1*, *Abcg1* и *Lxra*, участвующих в обратном транспорте холестерина [32, 42]. Также были выявлены нарушения липидного обмена после воздействия НЧ Al (100 мг/кг м.т.), Ti (50 мг/кг м.т.), Si (1,5, 3,0, и 6,0 мг/кг м.т. и 1000 мг/кг м.т.), Ag (5, 10 и 15 мл/л), Ni (1, 20, 150 мг/кг м.т.). В липидном спектре фиксировали повышение уровней триглицеридов [6, 11, 29, 32, 35], холестерина [11, 32, 35, 36] и липопротеинов низкой и очень низкой плотности [29, 35] при снижении уровня липопротеинов высокой плотности [29, 35]. После воздействия НЧ Se в дозах 0,2, 1 и 2 мг/кг м.т. отмечались изменения в бета-окислении жирных кислот (по изменению в содержании ацилкарнитинов и их производных в крови крыс) [4]. НЧ Ag (200 ppb) увеличивали продукцию ангиотензинпревращающего фермента (АПФ) в печени [34]. Накопление в крови АПФ и эфиров жирных кислот, повышенное содержание лизофосфатидилэтаноламинов, уменьшение содержания желчной и гликохолевой кислот указывают на угнетение секреторной функции печени и ее повреждение [4, 34].

Еще одним механизмом токсического действия НЧ является апоптоз. Было выяснено, что под действием НЧ Si, Ni, Ag и Zn у крыс повышалась экспрессия генов *Bax* (Si 900 мг/кг м.т., Ni 1, 20, 150 мг/кг м.т.), *Bcl-2* (Si 600 мг/кг м.т.), *Caspase3 (Cas-3)* (Si 900 мг/кг м.т., Ni 1, 20, 150 мг/кг м.т., Ag 50 мг/кг м.т., Ag+Zn 50 + 30 мг/кг м.т.) и *p53* (Ni 1, 20, 150 мг/кг м.т.) [28, 36, 37]. Уровень *Bcl-2* снижался под действием НЧ Ni [36], что объясняется угнетением антиапоптической системы. Изменение экспрессии этих генов подтверждает развитие апоптоза [43, 44].

Окислительный стресс, воспаление и апоптоз вызывают изменения на остальных уровнях организма. Так, на клеточном уровне в гепатоцитах крыс после воздействия НЧ Si (500 мкг/кг м.т.) и Ag (10 % м.т., 50 мг/кг м.т., 5 мкг/кг м.т., 0,04 мг/л$^{-1}$) отмечают дегенеративно-дистрофические изменения ядра (кариорексис, кариопиконоз, кариолизис) и цитоплазмы (вакуолизация), а также аниокариоз и гипертрофию цитоплазмы [8, 10, 31, 33, 37]. Воздействие НЧ также приводит к развитию митохондриальных нарушений. Так, НЧ Se (2 мг/кг м.т.) и Si (1,5, 3,0, и 6,0 мг/кг м.т.) вызывали снижение соотношения нормальных митохондрий [4], их деформации, разрыв и исчезновение крист [32]. Кроме того, НЧ Se (1мг/кг м.т., 2 мг/кг м.т.), Al (100 мг/кг м.т.), Si (500 мкг/кг м.т.) и Ag (0,04 мг/л-1) увеличивали долю дегенеративно измененных гепатоцитов, а также число безъядерных гепатоцитов и купферовских клеток [4, 10, 29, 31]. Были выявлены патологические изменения в виде дезорганизации гепатоцитов (Al 100 мг/кг м.т., Si 500 мкг/кг м.т.) [29, 31], инфильтрации воспалительными клетками (Si 500 мг/кг м.т., 1,5, 3,0, и 6,0 мг/кг м.т., Al 100 мг/кг м.т., 18 и 54 мкг/мышь) [3] [18, 29, 32], агрегатами макрофагов (Sn 54 и 162 мкг/мышь, Ti 162 мкг/мышь, Ag 5, 10, 15 мл/л) [11, 18], лимфоцитами и инородными материалами (Sn 54 и 162 мкг/мышь, Ti 162 мкг/мышь) [18].

На тканевом и органном уровнях заметно развитие дистрофий, индуцированных воспалением. Так, при воздействии НЧ (Mo 1,84 мг/м^3, Ag 5, 10, 15 мл/л) наблюдались распространенные гидропические [1], гиалиново-капельные [1] и жировые дистрофии печени [1, 11]. В некоторых случаях были зафиксированы некротические изменения: зоны некроза в паренхиме печени (Al 100 мг/кг м.т., Si 500 мкг/кг м.т., Si 900 мг/кг м.т./день и Ag 5, 10, 15 мл/л) [11, 28, 29, 31], в том числе желчных протоков (Al 100 мг/кг м.т., Ti 50 мг/кг м.т.) [29, 35]. Как и в легких, были выражены фибротические изменения: отложение коллагеновых волокон в перицентральной и перипортальной областях (Al 100 мг/кг м.т., Ti 50 мг/кг м.т.) [29, 35], повышенное отложение липидов и коллагена в печеночной ткани (Si 1,5,

[2] Toxicity Study of Silica Nanoparticles Following 94-Day Repeated Oral Administration in Sprague Dawley Rats: preprint (Version 1) / X. Cao, B. Xie, M. Xu, J. Li, X. Dai, Y. Tian, J. Zhang, Y. Chen [et al.] // Research Square. – 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4531919/v1

[3] Там же.

3,0, и 6,0 мг/кг м.т.) [32]. Также одно из исследований гистоморфологии печени показало, что в зависимости от пути поступления меняется степень повреждения: при пероральном поступлении НЧ Ni (150 мг/кг м.т.) отмечали застой, клеточную дегенерацию и инфильтрацию мононуклеарных клеток в печени, при внутрибрюшинном (20 мг/кг м.т.) – помимо инфильтрации мононуклеарных клеток, наблюдали кровоизлияние, пролиферацию клеток Купфера, синусоидальное расширение и некроз, а при внутривенном пути поступления в дозировке 1 мг/кг м.т. – схожие нарушения, кроме некроза [36].

Токсическое действие НЧ на печень проявляется преимущественно в виде воспалительных, дистрофических, фибротических и некротических изменений. Нарушения на организменном уровне авторами не оценивались, однако угнетение работы печени ввиду большой значимости выполняемых ею функций повышает риски развития многих заболеваний, в том числе других органов и систем. Лишь в единичном исследовании (Ag 200 мкг/кг м.т.) [30] не проявилось токсическое действие на печень, что может быть связано как со свойствами самого вещества, так и с условиями эксперимента.

Кардиотоксическое действие НЧ. В ряде исследований, в том числе в одном из наших [45], выявлено токсическое действие наночастиц на сердце. На молекулярно-генетическом уровне наблюдается усиление процессов окислительного и нитрозативного стресса под действием НЧ (Ag 0,5 мг/кг м.т., Cu 400 мг/кг м.т. и Fe 100 мг/кг м.т.) – выявлено значительное повышение уровней АФК, МДА [7], перекисного окисления липидов, восстановленного глутатиона, окисленного глутатиона [46], общей концентрации NO [46, 47], общего тиола, веществ, реагирующих с тиобарбитуровой кислотой, при сниженных уровнях СОД, каталазы и восстановленного глутатиона [47] в сердечных гомогенатах. Были зафиксированы признаки воспаления и апоптоза. В исследовании НЧ Ag (0,5 мг/кг м.т.) отмечалось значительное повышение концентрации IL-6 [46]. А в исследовании НЧ Ti и Zn (10 мг/кг м.т.) была показана тенденция к увеличению продукции TNF-α. Также было выявлено изменение продукции апоптических и аутофагических белков: снижение Cyt-C и Bcl-2 и увеличение LC3B, Beclin-1, Cas-3 и Cas-9, а также возрастание уровней кальция, что, вероятно, связано с повреждением митохондрий [48].

Окислительный стресс вызывает повреждение тканей миокарда и воспаление, которое, в свою очередь, ведет к повреждению тканей и усугубляет окислительный стресс [46]. Так формируется замкнутый круг, который начинается с клеточного уровня – чаще нарушений структуры митохондрий, и заканчивается гистоморфологическими изменениями органа, что впоследствии приводит к сердечной дисфункции.

При воздействии НЧ Al (1,70 мг/м^3), Si (250 мг/кг м.т., 500 мкг/кг м.т.), Ag (0,5 мг/кг м.т.), Pb (2,32 мг/кг м.т.), Cd (0,22 мг/кг м.т.) и Cu (400 мг/кг м.т.) у крыс и мышей было зафиксировано снижение тропонина [17] и АСТ[4] [17, 45], увеличение ЛДГ [17, 46, 47], миоглобина [47] и креатининкиназы-МВ [46, 47]. В некоторых исследованиях под действием НЧ Pb (2,5 мг/кг м.т.) и Cu (400 мг/кг м.т.), наоборот, наблюдали снижение активности креатининкиназы и ЛДГ [45], увеличение АСТ [47]. Такие изменения указывают на клеточное повреждение сердца наночастицами, а колебания показателей можно объяснить разными фазами ответной реакции на повреждения и отличающимися условиями экспериментов.

На клеточном уровне при воздействии НЧ Pb (2,5 мг/кг м.т.) заметны некоторые потери миофибрилл, разрушение внутреннего пространства митохондрий и, как следствие, снижение силы изометрических сокращений изолированных препаратов миокарда [45]. Это согласуется с результатами оценки митохондриальной функции: НЧ Ti и Zn в дозах 10 мг/кг м.т. при воздействии на крыс ускоряли потребление кислорода митохондриями сердца, разобщая их. Кроме того, наблюдались области с дезорганизацией саркомера с потерей ультраструктурного выравнивания, небольшими дезорганизованными митохондриями, элементарными частицами и лизосомами внутри, а также признаки апоптоза [48].

На тканевом и органном уровнях для сердца, как и для печени, оказалось характерным развитие дистрофии – при воздействии НЧ Pb (2,5 мг/кг м.т.) отмечали начальные признаки дистрофии миокарда [45]. А в исследовании НЧ Cu (100 мг/кг м.т.) наблюдались выраженная гипертрофия миокарда, умеренная конгестия и тяжелый очаговый некроз кардиомиоцитов с воспалительной клеточной инфильтрацией [47]. Фибротические изменения в виде скоплений коллагена фиксировались в одном исследовании (НЧ Zn и Ti 10 мг/кг м.т.) [48]. С другой стороны, при воздействии НЧ Ag (0,5 мг/кг м.т.) морфологические изменения структур сердца зафиксированы не были [46]. Это можно объяснить использованием покрытия НЧ Ag полиэтиленгликолем, обеспечивающим меньшее токсическое действие на организм, хотя после воздействия на крыс НЧ Si (без оболочки) в дозе 500 мг/кг м.т. также представлены данные об отсутствии значительных изменений[5], что может быть связано с условиями эксперимента.

---

[4] Toxicity Study of Silica Nanoparticles Following 94-Day Repeated Oral Administration in Sprague Dawley Rats: preprint (Version 1) / X. Cao, B. Xie, M. Xu, J. Li, X. Dai, Y. Tian, J. Zhang, Y. Chen [et al.] // Research Square. – 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4531919/v1

[5] Там же.

Даже небольшие изменения в сердце могут спровоцировать функциональные нарушения в его работе. Так, на организменном уровне при воздействии на крыс НЧ Pb в дозе 2,5 мг/кг м.т. наблюдалась тенденция к увеличению интервала QT, амплитуды зубца T и продолжительности интервала QRS [45]. Таким образом, НЧ вносят свой вклад в развитие заболеваний сердечно-сосудистой системы, тем самым увеличивая риски для здоровья населения.

Выводы. Представленный обзор научной литературы систематизирует и обобщает данные о пульмоно-, гепато- и кардиотоксических эффектах наночастиц на разных уровнях организации живого, раскрывая влияние НЧ как существенный фактор риска для здоровья населения. Обзор данных также освещает эффекты токсического действия НЧ при разных путях поступления, различной химической природе токсиканта, уровнях воздействующих доз, от чего зависит степень риска развития и тяжести индуцированных патологических состояний.

В качестве основных механизмов токсического действия можно выделить тесно связанные между собой прямое повреждение, генотоксичность, митохондриальное повреждение, апоптоз, воспаление и окислительный стресс: действие НЧ, как правило, индуцирует изменение уровней биомаркеров повреждения, гено- и цитотоксические явления, чрезмерную выработку АФК, повышение уровней медиаторов воспаления и повреждение тканей, что может вызывать заболевания не только изученных органов, но и некоторых систем организма. Оценка и анализ массива экспериментальных исследований по изучению потенциальных рисков действия НЧ на различных структурных уровнях могут быть использованы для выявления закономерностей такого воздействия и разработки критериев и методов гигиенической оценки рисков здоровью населения, а также для дальнейшей разработки системы профилактических мер, направленных на повышение устойчивости организма к пульмоно-, гепато- и кардиотоксическим эффектам НЧ.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Исследование и сравнительная оценка токсичности наночастиц оксида молибдена (VI) при многократной ингаляционной экспозиции крыс / Н.В. Зайцева, М.А. Землянова, М.С. Степанков, А.М. Игнатова, А.Е. Николаева, О.В. Пустовалова // Российские нанотехнологии. – 2023. – Т. 18, № 2. – С. 260–267. DOI: 10.56304/S1992722323020139

2. Степанков М.С. Оценка особенностей бионакопления и токсического действия наночастиц оксида меди (II) на органы дыхания при ингаляционном поступлении в организм в сравнении с микроразмерным химическим аналогом для задач профилактики // Анализ риска здоровью. – 2023. – № 4. – С. 124–133. DOI: 10.21668/health.risk/2023.4.12

3. Combination of cobalt, chromium and titanium nanoparticles increases cytotoxicity in vitro and pro-inflammatory cytokines *in vivo* / Z. Liu, H. Liu, R. Vowden, L. Hughes, D. Qi, W. Francis, G. Perino, R. Pink [et al.] // J. Orthop. Translat. – 2022. – Vol. 38. – P. 203–212. DOI: 10.1016/j.jot.2022.10.013

4. Оценка влияния наночастиц оксида селена на морфофункциональное состояние печени (экспериментальные данные) / Ю.В. Рябова, М.П. Сутункова, А.И. Чемезов, И.А. Минигалиева, Т.В. Бушуева, И.Г. Шеломенцев, С.В. Клинова, Р.Р. Сахаутдинова // Анализ риска здоровью. – 2023. – № 1. – С. 147–156. DOI: 10.21668/health.risk/2023.1.14

5. The influence of size and surface chemistry on the bioavailability, tissue distribution and toxicity of gold nanoparticles in zebrafish (Danio rerio) / D.L. Windell, S. Mourabit, J. Moger, S.F. Owen, M.J. Winter, C.R. Tyler // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2023. – Vol. 260. – P. 115019. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2023.115019

6. Oral toxicological study of titanium dioxide nanoparticles with a crystallite diameter of 6 nm in rats / J.-I. Akagi, Y. Mizuta, H. Akane, T. Toyoda, K. Ogawa // Part. Fibre Toxicol. – 2023. – Vol. 20, № 1. – P. 23. DOI: 10.1186/s12989-023-00533-x

7. Ultrasmall iron oxide nanoparticles cause significant toxicity by specifically inducing acute oxidative stress to multiple organs / L. Wu, W. Wen, X. Wang, D. Huang, J. Cao, X. Qi, S. Shen // Part. Fibre Toxicol. – 2022. – Vol. 19, № 1. – P. 24. DOI: 10.1186/s12989-022-00465-y

8. Liver tissue changes induced by biological and chemical silver nanoparticles in trained male Wistar rats / S.J. Ziaolhagh, M. Ardakanizadeh, A. Kaveh, B. Yahyaei // J. Trace Elem. Med. Biol. – 2023. – Vol. 79. – P. 127253. DOI: 10.1016/j.jtemb.2023.127253

9. An in vitro and in vivo study of the efficacy and toxicity of plant-extract-derived silver nanoparticles / A.S. Desai, A. Singh, Z. Edis, S. Haj Bloukh, P. Shah, B. Pandey, N. Agrawal, N. Bhagat // J. Funct. Biomater. – 2022. – Vol. 13, № 2. – P. 54. DOI: 10.3390/jfb13020054

10. Toxicity of silver nanoparticles in the presence of zinc oxide nanoparticles differs for acute and chronic exposures in zebrafish / M. Mahjoubian, A.S. Naeemi, Z. Moradi-Shoeili, C.R. Tyler, B. Mansouri // Arch. Environ. Contam. Toxicol. – 2023. – Vol. 84, № 1. – P. 1–17. DOI: 10.1007/s00244-022-00965-0

11. Biochemical and pathophysiological responses in Capoeta capoeta under lethal and sub-lethal exposures of silver nanoparticles / D. Azadikhah, A.M. Yalsuyi, S. Saha, N.C. Saha, C. Faggio // Water. – 2023. – Vol. 15, № 3. – P. 585. DOI: 10.3390/w15030585

12. Pulmonary and systemic toxicity in a rat model of pulmonary alveolar proteinosis induced by indium-tin oxide nanoparticles / N. Liu, Y. Guan, C. Zhou, Y. Wang, Z. Ma, S. Yao // Int. J. Nanomedicine. – 2022. – Vol. 17. – P. 713–731. DOI: 10.2147/IJN.S338955

13. Mechanistic approach on the pulmonary oxido-inflammatory stress induced by cobalt ferrite nanoparticles in rats / E.I. Hassanen, R.E. Abdelrahman, H. Aboul-Ella, M.A. Ibrahim, S. El-Dek, M. Shaalan // Biol. Trace Elem. Res. – 2024. – Vol. 202, № 2. – P. 765–777. DOI: 10.1007/s12011-023-03700-5

14. The protective effect of Nigella sativa extract on lung inflammation and oxidative stress induced by lipopolysaccharide in rats / A. Mokhtari-Zaer, F. Norouzi, V.R. Askari, M.R. Khazdair, N.M. Roshan, M. Boskabady, M. Hosseini, M.H. Boskabady // J. Ethnopharmacol. – 2020. – Vol. 253. – P. 112653. DOI: 10.1016/j.jep.2020.112653

15. Toll-like receptor 4 is a key regulator of asthma exacerbation caused by aluminum oxide nanoparticles via regulation of NF-κB phosphorylation / J.-O. Lim, W.-I. Kim, S.-W. Pak, S.-J. Lee, S.-H. Park, I.-S. Shin, J.-C. Kim // J. Hazard. Mater. – 2023. – Vol. 448. – P. 130884. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.130884

16. Zingerone ameliorates oxidative stress and inflammation in bleomycin-induced pulmonary fibrosis: modulation of the expression of TGF-β1 and iNOS / H. Gungor, M. Ekici, M. Onder Karayigit, N.H. Turgut, H. Kara, E. Arslanbas // Naunyn Schmiedebergs Arch. Pharmacol. – 2020. – Vol. 393, № 9. – P. 1659–1670. DOI: 10.1007/s00210-020-01881-7

17. Землянова М.А., Зайцева Н.В., Степанков М.С. Особенности токсического действия нано- и микрочастицоксида алюминия при многократной ингаляционной экспозиции // Гигиена и санитария. – 2023. – Т. 102, № 5. – С. 502–508. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-5-502-508

18. Acute phase response following pulmonary exposure to soluble and insoluble metal oxide nanomaterials in mice / C. Torero Gutierrez, C. Loizides, I. Hafez, A. Brostrom, H. Wolff, J. Szarek, T. Berthing, A. Mortensen [et al.] // Part. Fibre Toxicol. – 2023. – Vol. 20, № 1. – P. 4. DOI: 10.1186/s12989-023-00514-0

19. Оценка острой токсичности наночастиц оксида свинца на крысах при ингаляционной экспозиции / М.П. Сутункова, И.А. Минигалиева, С.В. Клинова, Ю.В. Рябова, А.В. Тажигулова, Л.В. Шабардина, В.А. Батенева, И.Г. Шеломенцев, Л.И. Привалова // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. – 2023. – Т. 31, № 9. – С. 24–30. DOI: 10.35627/2219-5238/2023-31-9-24-30

20. Poitout-Belissent F., Grant S.N., Tepper J.S. Aspiration and inspiration: Using bronchoalveolar lavage for toxicity assessment // Toxicol. Pathol. – 2021. – Vol. 49, № 2. – P. 386–396. DOI: 10.1177/0192623320929318

21. Lung single-cell transcriptomics offers insights into the pulmonary interstitial toxicity caused by silica nanoparticles / Y. Li, Q. Yao, H. Xu, J. Ren, Y. Zhu, C. Guo, Y. Li // Environ. Health (Wash.). – 2024. – Vol. 2, № 11. – P. 786–801. DOI: 10.1021/envhealth.4c00052

22. Correlation between oxidative stress and hydroxyproline content in liver fibrosis / A. Nabil, I. Ali, G. Shiha, F. Zahran // Biochemistry Letters. – 2021. – Vol. 17. – P. 22–29. DOI: 10.21608/blj.2021.180487

23. Oxidative stress contributes to the induction and persistence of TGF-β1 induced pulmonary fibrosis / Y. Cui, J. Robertson, S. Maharaj, L. Waldhauser, J. Niu, J. Wang, L. Farkas, M. Kolb, J. Gauldie // Int. J. Biochem. Cell Biol. – 2011. – Vol. 43, № 8. – P. 1122–1133. DOI: 10.1016/j.biocel.2011.04.005

24. Regulation of gasdermin D by miR-379-5p is involved in arsenite-induced activation of hepatic stellate cells and in fibrosis via secretion of IL-1β from human hepatic cells / J. Li, J. Xue, D. Wang, X. Dai, Q. Sun, T. Xiao, L. Wu, H. Xia [et al.] // Metallomics. – 2019. – Vol. 11, № 2. – P. 483–495. DOI: 10.1039/c8mt00321a

25. Elevated interleukin-4 levels predicted advanced fibrosis in chronic hepatitis C / B. Batsaikhan, M.-Y. Lu, M.-L. Yeh, C.-I. Huang, C.-F. Huang, Z.-Y. Lin, S.-C. Chen, J.-F. Huang [et al.] // J. Chin. Med. Assoc. – 2019. – Vol. 82, № 4. – P. 277–281. DOI: 10.1097/JCMA.0000000000000064

26. Chronic inflammation involves CCL11 and IL-13 to facilitate the development of liver cirrhosis and fibrosis in chronic hepatitis B virus infection / S.-W. Wong, Y.-W. Ting, Y.-K. Yong, H.-Y. Tan, M. Barathan, B. Riazalhosseini, C.J. Bee, K.-K. Tee [et al.] // Scand. J. Clin. Lab. Invest. – 2021. – Vol. 81, № 2. – P. 147–159. DOI: 10.1080/00365513.2021.1876245

27. COX-2 is required to mediate crosstalk of ROS-dependent activation of MAPK/NF-κB signaling with pro-inflammatory response and defense-related NO enhancement during challenge of macrophage-like cell line with Giardia duodenalis / Y. Zhao, Y. Yang, M. Liu, X. Qin, X. Yu, H. Zhao, X. Li, W. Li // PLoS Negl. Trop. Dis. – 2022. – Vol. 16, № 4. – P. e0010402. DOI: 10.1371/journal.pntd.0010402

28. In vivo toxicity of oral administrated nano-SiO2: Can food additives increase apoptosis? / M. Firouzamandi, M. Hejazy, A. Mohammadi, A.A. Shahbazfar, R. Norouzi // Biol. Trace Elem. Res. – 2023. – Vol. 201, № 10. – P. 4769–4778. DOI: 10.1007/s12011-022-03542-7

29. Ameliorative effects of quercetin against hepatic toxicity of oral sub-chronic co-exposure to aluminum oxide nanoparticles and lead-acetate in male rats / K. Abo-EL-Sooud, Y.M. Abd-Elhakim, M.M.M. Hashem, A.E. El-Metwally, B.A. Hassan, H.H.M. El-Nour // Naunyn Schmiedebergs Arch. Pharmacol. – 2023. – Vol. 396, № 4. – P. 737–747. DOI: 10.1007/s00210-022-02351-y

30. Effect of silver nanoparticles synthesized by pulsed laser ablation in liquid on the hematological, hepatic, and renal functions of albino rats / M.S. Edan, F.I. Sultan, A.H. Attallah, A.J. Haider, M.J. Haider, A.T. Tawfeeq, N.N. Hussein, O. Husain Khalif // Iraqi Journal of Science. – 2023. – Vol. 64, № 12. – P. 6242–6256. DOI: 10.24996/ijs.2023.64.12.13

31. Synthesis and characterization of silica, silver-silica, and zinc oxide-silica nanoparticles for evaluation of blood biochemistry, oxidative stress, and hepatotoxicity in Albino Rats / A. Ali, S. Saeed, R. Hussain, G. Afzal, A.B. Siddique, G. Parveen, M. Hasan, G. Caprioli // ACS Omega. – 2023. – Vol. 8, № 23. – P. 20900–20911. DOI: 10.1021/acsomega.3c01674

32. Silica nanoparticles aggravated the metabolic associated fatty liver disease through disturbed amino acid and lipid metabolisms-mediated oxidative stress / A. Abulikemu, X. Zhao, H. Xu, Y. Li, R. Ma, Q. Yao, J. Wang, Z. Sun [et al.] // Redox Biol. – 2023. – Vol. 59. – P. 102569. DOI: j.redox.2022.102569

33. Subacute toxic effects of silver nanoparticles oral administration and withdrawal on the structure and function of adult Albino Rats' hepatic tissue / S.M. Yousof, H. Erfan, M.M. Hosny, S.A. Shehata, K. El-Sayed // Saudi J. Biol. Sci. – 2022. – Vol. 29, № 5. – P. 3890–3898. DOI: 10.1016/j.sjbs.2022.02.054

34. Nayek S., Lund A.K., Verbeck G.F. Inhalation exposure to silver nanoparticles induces hepatic inflammation and oxidative stress, associated with altered renin-angiotensin system signaling, in Wistar rats // Environ. Toxicol. – 2022. – Vol. 37, № 3. – P. 457–467. DOI: 10.1002/tox.23412

35. Assessment of the oxidative damage and genotoxicity of titanium dioxide nanoparticles and exploring the protective role of holy basil oil nanoemulsions in rats / M.F. Sallam, H.M.S. Ahmed, A.A. El-Nekeety, K.A. Diab, S.H. Abdel-Aziem, H.A. Sharaf, M.A. Abdel-Wahhab // Biol. Trace Elem. Res. – 2023. – Vol. 201, № 3. – P. 1301–1316. DOI: 10.1007/s12011-022-03228-0

36. Comparison of nickel oxide nano and microparticles toxicity in rat liver: molecular, biochemical, and histopathological study / C. Adiguzel, H. Karaboduk, F.G. Apaydin, S. Kalender, Y. Kalender // Toxicol. Res. (Camb.). – 2023. – Vol. 12, № 5. – P. 741–750. DOI: 10.1093/toxres/tfad062

37. Evaluation of the ameliorative effect of zinc nanoparticles against silver nanoparticle-induced toxicity in liver and kidney of rats / A.M. Shehata, F.M.S. Salem, E.M. El-Saied, S.S. Abd El-Rahman, M.Y. Mahmoud, P.A. Noshy // Biol. Trace Elem. Res. – 2022. – Vol. 200, № 3. – P. 1201–1211. DOI: 10.1007/s12011-021-02713-2

38. Pisoschi A.M., Pop A. The role of antioxidants in the chemistry of oxidative stress: A review // Eur. J. Med. Chem. – 2015. – Vol. 97. – P. 55–74. DOI: 10.1016/j.ejmech.2015.04.040

39. Effect of ELOVL6 on the lipid metabolism of bovine adipocytes / Z. Junjvlieke, R. Khan, C. Mei, G. Cheng, S. Wang, S.H.A. Raza, J. Hong, X. Wang [et al.] // Genomics. – 2020. – Vol. 112, № 3. – P. 2282–2290. DOI: 10.1016/j.ygeno.2019.12.024

40. FASN, SCD1 and ANXA9 gene polymorphism as genetic predictors of the fatty acid profile of sheep milk / E. Pecka-Kiełb, I. Kowalewska-Łuczak, E. Czerniawska-Piątkowska, B. Króliczewska // Sci. Rep. – 2021. – Vol. 11, № 1. – P. 23761. DOI: 10.1038/s41598-021-03186-y

41. Mechanisms mediating the regulation of peroxisomal fatty acid beta-oxidation by PPARα / M. Tahri-Joutey, P. Andreoletti, S. Surapureddi, B. Nasser, M. Cherkaoui-Malki, N. Latruffe // Int. J. Mol. Sci. – 2021. – Vol. 22, № 16. – P. 8969. DOI: 10.3390/ijms22168969

42. Genomic variants and multilevel regulation of ABCA1, ABCG1, and SCARB1 expression in atherogenesis / A.V. Rozhkova, V.G. Dmitrieva, E.V. Nosova, A.D. Dergunov, S.A. Limborska, L.V. Dergunova // J. Cardiovasc. Dev. Dis. – 2021. – Vol. 8, № 12. – P. 170. DOI: 10.3390/jcdd8120170

43. Hussar P. Apoptosis regulators Bcl-2 and Caspase-3 // Encyclopedia. – 2022. – Vol. 2, № 4. – P. 1624–1636. DOI: 10.3390/encyclopedia2040111

44. Westphal D., Kluck R.M., Dewson G. Building blocks of the apoptotic pore: how Bax and Bak are activated and oligomerize during apoptosis // Cell Death Differ. – 2014. – Vol. 21, № 2. – P. 196–205. DOI: 10.1038/cdd.2013.139

45. On the mechanisms of the cardiotoxic effect of lead oxide nanoparticles / I.A. Minigaliyeva, S.V. Klinova, M.P. Sutunkova, Y.V. Ryabova, I.E. Valamina, I.G. Shelomentsev, N.T. Shtin, T.V. Bushueva [et al.] // Cardiovasc. Toxicol. – 2024. – Vol. 24, № 1. – P. 49–61. DOI: 10.1007/s12012-023-09814-5

46. Impact of intratracheal administration of polyethylene glycol-coated silver nanoparticles on the heart of normotensive and hypertensive mice / A. Nemmar, S. Al-Salam, Y.E. Greish, S. Beegam, N.E. Zaaba, B.H. Ali // Int. J. Mol. Sci. – 2023. – Vol. 24, № 10. – P. 8890. DOI: 10.3390/ijms24108890

47. Tousson E., El-Gharbawy D.M. Impact of Saussurea lappa root extract against copper oxide nanoparticles induced oxidative stress and toxicity in rat cardiac tissues // Environ. Toxicol. – 2023. – Vol. 38, № 2. – P. 415–421. DOI: 10.1002/tox.23688

48. Food-grade titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles induce toxicity and cardiac damage after oral exposure in rats / M.A. Herrera-Rodríguez, M. Del Pilar Ramos-Godinez, A. Cano-Martínez, F.C. Segura, A. Ruiz-Ramírez, N. Pavon, E. Lira-Silva, R. Bautista-Pérez [et al.] // Part. Fibre Toxicol. – 2023. – Vol. 20, № 1. – P. 43. DOI: 10.1186/s12989-023-00553-7

Современные данные о пульмоно-, гепато- и кардиотоксичности наночастиц in vivo (литературный обзор) / Н.А. Гертан, М.П. Сутункова, Л.В. Шабардина, Т.В. Махорина, К.М. Никогосян, Р.Ф. Минигалиева // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 2. – С. 185–195. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.16

UDC 613.632.2; 615.916
DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.16.eng

Read online

Review

UPDATE ON PULMONO-, HEPATO-, AND CARDIOTOXICITY OF NANOPARTICLES *IN VIVO:* A LITERATURE REVIEW

N.A. Gertan[1], M.P. Sutunkova[1,2], L.V. Shabardina[1], T.V. Makhorina[1], K.M. Nikogosyan[1], R.F. Minigalieva[1,3]

[1]Yekaterinburg Medical Research Center for Prevention and Occupational Health of Industrial Workers, 30 Popov St., Yekaterinburg, 620014, Russian Federation
[2]Ural State Medical University, 3 Repin St., Yekaterinburg, 620028, Russian Federation
[3]Ural Federal University, 51 Lenin Ave., Yekaterinburg, 620000, Russian Federation

A wide use of nanoparticles (NPs) in various industries, agriculture, science, medicine and cosmetology, as well as their omnipresence in the environment necessitate a comprehensive study of their effects on living systems to predict health risks and develop preventive measures. In this study, we aimed to study and systematize available scientific evidence of toxic effects of nanoparticles on the lungs, liver, and heart.

The search for publications issued in 2022–2024 was carried out in Russian (eLIBRARY.RU) and foreign (PubMed, Google Scholar) databases and electronic libraries. Articles containing information on health effects of particles in the 1–100 nanometer range were eligible for inclusion in the review while descriptions of in vitro, in silico, and epidemiological studies were excluded. Of more than 150 articles screened, we selected 31 full-text in vivo study publications (including one preprint) and 18 articles describing the identified effects.

Toxic effects of nanoparticles are attributed to their unique properties and depend on numerous factors, including chemical composition, size, and shape of nanoparticles, their concentration, exposure duration, and ability to cross internal barriers of the body. Adverse effects of nanoparticles are observed at all structural levels of the organism. Nanoparticles mainly induce inflammatory, dystrophic and necrotic changes. Closely interrelated inflammation and oxidative stress are the main mechanisms of toxicity.

Assessment and analysis of an array of experimental studies on potential risks of nanoparticle exposure at various structural levels make it possible to identify minute changes in organs for further development of a system of preventive measures aimed at increasing resistance to such NP-mediated pathological effects.

Keywords: *nanotoxicity, nanoparticles, intoxication, review, in vivo studies, lung, liver, heart.*

References

1. Zaitseva N.V., Zemlyanova M.A., Stepankov M.S., Ignatova A.M., Nikolaeva A.E., Pustovalova O.V. Issledovanie i sravnitel'naya otsenka toksichnosti nanochastits oksida molibdena (VI) pri mnogokratnoi ingalyatsionnoi ekspozitsii krys [Study and comparative evaluation of toxicity of molybdenum (VI) oxide nanoparticles upon repeated inhalation exposure in rats]. *Rossiiskie nanotekhnologii*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 260–267. DOI: 10.56304/S1992722323020139 (in Russian).

2. Stepankov M.S. Peculiarities of bioaccumulation and toxic effects produced by copper oxide (II) nanoparticles on the respiratory organs under inhalation exposure as opposed to their micro-sized chemical analogue: assessment for prevention purposes. *Health Risk Analysis*, 2023, no. 4, pp. 124–133. DOI: 10.21668/health.risk/2023.4.12.eng

3. Liu Z., Liu H., Vowden R., Hughes L., Qi D., Francis W., Perino G., Pink R. [et al.]. Combination of cobalt, chromium and titanium nanoparticles increases cytotoxicity in vitro and pro-inflammatory cytokines in vivo. *J. Orthop. Translat.*, 2022, vol. 38, pp. 203–212. DOI: 10.1016/j.jot.2022.10.013

© Gertan N.A., Sutunkova M.P., Shabardina L.V., Makhorina T.V., Nikogosyan K.M., Minigalieva R.F., 2025

Natalia A. Gertan – Junior Researcher of the Department of Toxicology and Bioprophylaxis (e-mail: gertan00@mail.ru; tel.: +7 (343) 371-11-05; ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3239-5998).

Marina P. Sutunkova – Doctor of Medical Sciences, director; Head of the Department of Occupational Hygiene and Medicine (e-mail: sutunkova@ymrc.ru; tel.: +7 (343) 371-20-87; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1743-7642).

Lada V. Shabardina – Junior Researcher of the Department of Toxicology and Bioprophylaxis (e-mail: lada.shabardina@mail.ru; tel.: +7 (343) 371-11-05; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8284-0008).

Tatyana V. Makhorina – Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher of the Department of Toxicology and Bioprophylaxis (e-mail: lisa430@yandex.ru; tel.: +7 (343) 214-11-31; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6126-9706).

Karen M. Nikogosyan – Junior Researcher of the Department of Toxicology and Bioprophylaxis (e-mail: nikoghosyankm@ymrc.ru; tel.: +7 (343) 371-20-87; ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0780-5733).

Regina F. Minigalieva – laboratory research assistant of the Department of Molecular Biology and Electron Microscopy (e-mail: regina.minigalieva@yandex.ru; tel.: +7 (343) 371-20-87; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0013-6111).

4. Ryabova Yu.V., Sutunkova M.P., Chemezov A.I., Minigalieva I.A., Bushueva T.V., Shelomentsev I.G., Klinova S.V., Sakhautdinova R.R. Effects of selenium oxide nanoparticles on the morphofunctional state of the liver: experimental data. *Health Risk Analysis*, 2023, no. 1, pp. 147–156. DOI: 10.21668/health.risk/2023.1.14.eng

5. Windell D.L., Mourabit S., Moger J., Owen S.F., Winter M.J., Tyler C.R. The influence of size and surface chemistry on the bioavailability, tissue distribution and toxicity of gold nanoparticles in zebrafish (Danio rerio). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, vol. 260, pp. 115019. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2023.115019

6. Akagi J.-I., Mizuta Y., Akane H., Toyoda T., Ogawa K. Oral toxicological study of titanium dioxide nanoparticles with a crystallite diameter of 6 nm in rats. *Part. Fibre Toxicol.*, 2023, vol. 20, no. 1, pp. 23. DOI: 10.1186/s12989-023-00533-x

7. Wu L., Wen W., Wang X., Huang D., Cao J., Qi X., Shen S. Ultrasmall iron oxide nanoparticles cause significant toxicity by specifically inducing acute oxidative stress to multiple organs. *Part. Fibre Toxicol.*, 2022, vol. 19, no. 1, pp. 24. DOI: 10.1186/s12989-022-00465-y

8. Ziaolhagh S.J., Ardakanizadeh M., Kaveh A., Yahyaei B. Liver tissue changes induced by biological and chemical silver nanoparticles in trained male Wistar rats. *J. Trace Elem. Med. Biol.*, 2023, vol. 79, pp. 127253. DOI: 10.1016/j.jtemb.2023.127253

9. Desai A.S., Singh A., Edis Z., Haj Bloukh S., Shah P., Pandey B., Agrawal N., Bhagat N. An in vitro and in vivo study of the efficacy and toxicity of plant-extract-derived silver nanoparticles. *J. Funct. Biomater.*, 2022, vol. 13, no. 2, pp. 54. DOI: 10.3390/jfb13020054

10. Mahjoubian M., Naeemi A.S., Moradi-Shoeili Z., Tyler C.R., Mansouri B. Toxicity of silver nanoparticles in the presence of zinc oxide nanoparticles differs for acute and chronic exposures in zebrafish. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 2023, vol. 84, no. 1, pp. 1–17. DOI: 10.1007/s00244-022-00965-0

11. Azadikhah D., Yalsuyi A.M., Saha S., Saha N.C., Faggio C. Biochemical and pathophysiological responses in Capoeta capoeta under lethal and sub-lethal exposures of silver nanoparticles. *Water*, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 585. DOI: 10.3390/w15030585

12. Liu N., Guan Y., Zhou C., Wang Y., Ma Z., Yao S. Pulmonary and systemic toxicity in a rat model of pulmonary alveolar proteinosis induced by indium-tin oxide nanoparticles. *Int. J. Nanomedicine*, 2022, vol. 17, pp. 713–731. DOI: 10.2147/IJN.S338955

13. Hassanen E.I., Abdelrahman R.E., Aboul-Ella H., Ibrahim M.A., El-Dek S., Shaalan M. Mechanistic approach on the pulmonary oxido-inflammatory stress induced by cobalt ferrite nanoparticles in rats. *Biol. Trace Elem. Res.*, 2024, vol. 202, no. 2, pp. 765–777. DOI: 10.1007/s12011-023-03700-5

14. Mokhtari-Zaer A., Norouzi F., Askari V.R., Khazdair M.R., Roshan N.M., Boskabady M., Hosseini M., Boskabady M.H. The protective effect of Nigella sativa extract on lung inflammation and oxidative stress induced by lipopolysaccharide in rats. *J. Ethnopharmacol.*, 2020, vol. 253, pp. 112653. DOI: 10.1016/j.jep.2020.112653

15. Lim J.-O., Kim W.-I., Pak S.-W., Lee S.-J., Park S.-H., Shin I.-S., Kim J.-C. Toll-like receptor 4 is a key regulator of asthma exacerbation caused by aluminum oxide nanoparticles via regulation of NF-κB phosphorylation. *J. Hazard. Mater.*, 2023, vol. 448, pp. 130884. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.130884

16. Gungor H., Ekici M., Onder Karayigit M., Turgut N.H., Kara H., Arslanbas E. Zingerone ameliorates oxidative stress and inflammation in bleomycin-induced pulmonary fibrosis: modulation of the expression of TGF-β1 and iNOS. *Naunyn Schmiedebergs Arch. Pharmacol.*, 2020, vol. 393, no. 9, pp. 1659–1670. DOI: 10.1007/s00210-020-01881-7

17. Zemlyanova M.A., Zaitseva N.V., Stepankov M.S. Peculiarities of toxic effects produced by aluminum oxide nano- and microparticles under multiple inhalation exposure. *Gigiena i sanitariya*, 2023, vol. 102, no. 5, pp. 502–508. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-5-502-508 (in Russian).

18. Torero Gutierrez C., Loizides C., Hafez I., Brostrom A., Wolff H., Szarek J., Berthing T., Mortensen A. [et al.]. Acute phase response following pulmonary exposure to soluble and insoluble metal oxide nanomaterials in mice. *Part. Fibre Toxicol.*, 2023, vol. 20, no. 1, pp. 4. DOI: 10.1186/s12989-023-00514-0

19. Sutunkova M.P., Minigalieva I.A., Klinova S.V., Ryabova Yu.V., Tazhigulova A.V., Shabardina L.V., Bateneva V.A., Shelomentsev I.G., Privalova L.I. Acute Toxicity Induced by Inhalation Exposure to Lead Oxide Nanoparticles in Rats. *ZNiSO*, 2023, vol. 31, no. 9, pp. 24–30. DOI: 10.35627/2219-5238/2023-31-9-24-30 (in Russian).

20. Poitout-Belissent F., Grant S.N., Tepper J.S. Aspiration and inspiration: Using bronchoalveolar lavage for toxicity assessment. *Toxicol. Pathol.*, 2021, vol. 49, no. 2, pp. 386–396. DOI: 10.1177/0192623320929318

21. Li Y., Yao Q., Xu H., Ren J., Zhu Y., Guo C., Li Y. Lung single-cell transcriptomics offers insights into the pulmonary interstitial toxicity caused by silica nanoparticles. *Environ. Health (Wash.)*, 2024, vol. 2, no. 11, pp. 786–801. DOI: 10.1021/envhealth.4c00052

22. Nabil A., Ali I., Shiha G., Zahran F. Correlation between oxidative stress and Hydroxyproline content in Liver Fibrosis. *Biochemistry Letters*, 2021, vol. 17, pp. 22–29. DOI: 10.21608/blj.2021.180487

23. Cui Y., Robertson J., Maharaj S., Waldhauser L., Niu J., Wang J., Farkas L., Kolb M., Gauldie J. Oxidative stress contributes to the induction and persistence of TGF-β1 induced pulmonary fibrosis. *Int. J. Biochem. Cell Biol.*, 2011, vol. 43, no. 8, pp. 1122–1133. DOI: 10.1016/j.biocel.2011.04.005

24. Li J., Xue J., Wang D., Dai X., Sun Q., Xiao T., Wu L., Xia H. [et al.]. Regulation of gasdermin D by miR-379-5p is involved in arsenite-induced activation of hepatic stellate cells and in fibrosis via secretion of IL-1β from human hepatic cells. *Metallomics*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 483–495. DOI: 10.1039/c8mt00321a

25. Batsaikhan B., Lu M.-Y., Yeh M.-L., Huang C.-I., Huang C.-F., Lin Z.-Y., Chen S.-C., Huang J.-F. [et al.]. Elevated interleukin-4 levels predicted advanced fibrosis in chronic hepatitis C. *J. Chin. Med. Assoc.*, 2019, vol. 82, no. 4, pp. 277–281. DOI: 10.1097/JCMA.0000000000000064

26. Wong S.-W., Ting Y.-W., Yong Y.-K., Tan H.-Y., Barathan M., Riazalhosseini B., Bee C.J., Tee K.-K. [et al.]. Chronic inflammation involves CCL11 and IL-13 to facilitate the development of liver cirrhosis and fibrosis in chronic hepatitis B virus infection. *Scand. J. Clin. Lab. Invest.*, 2021, vol. 81, no. 2, pp. 147–159. DOI: 10.1080/00365513.2021.1876245

27. Zhao Y., Yang Y., Liu M., Qin X., Yu X., Zhao H., Li X., Li W. COX-2 is required to mediate crosstalk of ROS-dependent activation of MAPK/NF-κB signaling with pro-inflammatory response and defense-related NO enhancement during

challenge of macrophage-like cell line with Giardia duodenalis. *PLoS Negl. Trop. Dis.*, 2022, vol. 16, no. 4, pp. e0010402. DOI: 10.1371/journal.pntd.0010402

28. Firouzamandi M., Hejazy M., Mohammadi A., Shahbazfar A.A., Norouzi R. In vivo toxicity of oral administrated nano-SiO2: Can food additives increase apoptosis? *Biol. Trace Elem. Res.*, 2023, vol. 201, no. 10, pp. 4769–4778. DOI: 10.1007/s12011-022-03542-7

29. Abo-EL-Sooud K., Abd-Elhakim Y.M., Hashem M.M.M., El-Metwally A.E., Hassan B.A., El-Nour H.H.M. Ameliorative effects of quercetin against hepatic toxicity of oral sub-chronic co-exposure to aluminum oxide nanoparticles and lead-acetate in male rats. *Naunyn Schmiedebergs Arch. Pharmacol.*, 2023, vol. 396, no. 4, pp. 737–747. DOI: 10.1007/s00210-022-02351-y

30. Edan M.S., Sultan F.I., Attallah A.H., Haider A.J., Haider M.J., Tawfeeq A.T., Hussein N.N., Husain Khalif O. Effect of silver nanoparticles synthesized by pulsed laser ablation in liquid on the hematological, hepatic, and renal functions of albino rats. *Iraqi Journal of Science*, 2023, vol. 64, no. 12, pp. 6242–6256. DOI: 10.24996/ijs.2023.64.12.13

31. Ali A., Saeed S., Hussain R., Afzal G., Siddique A.B., Parveen G., Hasan M., Caprioli G. Synthesis and characterization of silica, silver-silica, and zinc oxide-silica nanoparticles for evaluation of blood biochemistry, oxidative stress, and hepatotoxicity in albino rats. *ACS Omega*, 2023, vol. 8, no. 23, pp. 20900–20911. DOI: 10.1021/acsomega.3c01674

32. Abulikemu A., Zhao X., Xu H., Li Y., Ma R., Yao Q., Wang J., Sun Z. [et al.]. Silica nanoparticles aggravated the metabolic associated fatty liver disease through disturbed amino acid and lipid metabolisms-mediated oxidative stress. *Redox Biol.*, 2023, vol. 59, pp. 102569. DOI: 10.1016/j.redox.2022.102569

33. Yousof S.M., Erfan H., Hosny M.M., Shehata S.A., El-Sayed K. Subacute toxic effects of silver nanoparticles oral administration and withdrawal on the structure and function of adult Albino Rats' hepatic tissue. *Saudi J. Biol. Sci.*, 2022, vol. 29, no. 5, pp. 3890–3898. DOI: 10.1016/j.sjbs.2022.02.054

34. Nayek S., Lund A.K., Verbeck G.F. Inhalation exposure to silver nanoparticles induces hepatic inflammation and oxidative stress, associated with altered renin-angiotensin system signaling, in Wistar rats. *Environ. Toxicol.*, 2022, vol. 37, no. 3, pp. 457–467. DOI: 10.1002/tox.23412

35. Sallam M.F., Ahmed H.M.S., El-Nekeety A.A., Diab K.A., Abdel-Aziem S.H., Sharaf H.A., Abdel-Wahhab M.A. Assessment of the oxidative damage and genotoxicity of titanium dioxide nanoparticles and exploring the protective role of holy basil oil nanoemulsions in rats. *Biol. Trace Elem. Res.*, 2023, vol. 201, no. 3, pp. 1301–1316. DOI: 10.1007/s12011-022-03228-0

36. Adiguzel C., Karaboduk H., Apaydin F.G., Kalender S., Kalender Y. Comparison of nickel oxide nano and microparticles toxicity in rat liver: molecular, biochemical, and histopathological study. *Toxicol. Res. (Camb.)*, 2023, vol. 12, no. 5, pp. 741–750. DOI: 10.1093/toxres/tfad062

37. Shehata A.M., Salem F.M.S., El-Saied E.M., Abd El-Rahman S.S., Mahmoud M.Y., Noshy P.A. Evaluation of the ameliorative effect of zinc nanoparticles against silver nanoparticle-induced toxicity in liver and kidney of rats. *Biol. Trace Elem. Res.*, 2022, vol. 200, no. 3, pp. 1201–1211. DOI: 10.1007/s12011-021-02713-2

38. Pisoschi A.M., Pop A. The role of antioxidants in the chemistry of oxidative stress: A review. *Eur. J. Med. Chem.*, 2015, vol. 97, pp. 55–74. DOI: 10.1016/j.ejmech.2015.04.040

39. Junjvlieke Z., Khan R., Mei C., Cheng G., Wang S., Raza S.H.A., Hong J., Wang X. [et al.]. Effect of ELOVL6 on the lipid metabolism of bovine adipocytes. *Genomics*, 2020, vol. 112, no. 3, pp. 2282–2290. DOI: 10.1016/j.ygeno.2019.12.024

40. Pecka-Kiełb E., Kowalewska-Łuczak I., Czerniawska-Piątkowska E., Króliczewska B. FASN, SCD1 and ANXA9 gene polymorphism as genetic predictors of the fatty acid profile of sheep milk. *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 23761. DOI: 10.1038/s41598-021-03186-y

41. Tahri-Joutey M., Andreoletti P., Surapureddi S., Nasser B., Cherkaoui-Malki M., Latruffe N. Mechanisms mediating the regulation of peroxisomal fatty acid beta-oxidation by PPARα. *Int. J. Mol. Sci.*, 2021, vol. 22, no. 16, pp. 8969. DOI: 10.3390/ijms22168969

42. Rozhkova A.V., Dmitrieva V.G., Nosova E.V., Dergunov A.D., Limborska S.A., Dergunova L.V. Genomic variants and multilevel regulation of ABCA1, ABCG1, and SCARB1 expression in atherogenesis. *J. Cardiovasc. Dev. Dis.*, 2021, vol. 8, no. 12, pp. 170. DOI: 10.3390/jcdd8120170

43. Hussar P. Apoptosis Regulators Bcl-2 and Caspase-3. *Encyclopedia*, 2022, vol. 2, no. 4, pp. 1624–1636. DOI: 10.3390/encyclopedia2040111

44. Westphal D., Kluck R.M., Dewson G. Building blocks of the apoptotic pore: how Bax and Bak are activated and oligomerize during apoptosis. *Cell Death Differ.*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 196–205. DOI: 10.1038/cdd.2013.139

45. Minigaliyeva I.A., Klinova S.V., Sutunkova M.P., Ryabova Y.V., Valamina I.E., Shelomentsev I.G., Shtin T.N., Bushueva T.V. [et al.]. On the mechanisms of the cardiotoxic effect of lead oxide nanoparticles. *Cardiovasc. Toxicol.*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 49–61. DOI: 10.1007/s12012-023-09814-5

46. Nemmar A., Al-Salam S., Greish Y.E., Beegam S., Zaaba N.E., Ali B.H. Impact of intratracheal administration of polyethylene glycol-coated silver nanoparticles on the heart of normotensive and hypertensive mice. *Int. J. Mol. Sci.*, 2023, vol. 24, no. 10, pp. 8890. DOI: 10.3390/ijms24108890

47. Tousson E., El-Gharbawy D.M. Impact of Saussurea lappa root extract against copper oxide nanoparticles induced oxidative stress and toxicity in rat cardiac tissues. *Environ. Toxicol.*, 2023, vol. 38, no. 2, pp. 415–421. DOI: 10.1002/tox.23688

48. Herrera-Rodríguez M.A., del Pilar Ramos-Godinez M., Cano-Martínez A., Segura F.C., Ruiz-Ramírez A., Pavón N., Lira-Silva E., Bautista-Pérez R. [et al.]. Food-grade titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles induce toxicity and cardiac damage after oral exposure in rats. *Part. Fibre Toxicol.*, 2023, vol. 20, no. 1, pp. 43. DOI: 10.1186/s12989-023-00553-7

Gertan N.A., Sutunkova M.P., Shabardina L.V., Makhorina T.V., Nikogosyan K.M., Minigalieva R.F. Update on pulmono-, hepato-, and cardiotoxicity of nanoparticles in vivo: a literature review. Health Risk Analysis, 2025, no. 2, pp. 185–195. DOI: 10.21668/health.risk/2025.2.16.eng

Получена: 21.03.2025
Одобрена: 05.05.2025
Принята к публикации: 14.06.2025

НОВЫЕ ЗАКОНОДАТЕЛЬНЫЕ, НОРМАТИВНЫЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ДОКУМЕНТЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В СФЕРЕ АНАЛИЗА РИСКОВ ЗДОРОВЬЮ

Второй квартал 2025 г. (23 марта 2025 г. – 21 июня 2025 г.)

Решение Коллегии Евразийской экономической комиссии (ЕЭК) от 20.05.2025 № 43 «О внесении изменения в перечень международных и региональных (межгосударственных) стандартов, а в случае их отсутствия – национальных (государственных) стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований технического регламента Таможенного союза "Технический регламент на масложировую продукцию" (ТР ТС 024/2011)»

Дополнен перечень стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований ТР ТС 024/2011 «Технический регламент на масложировую продукцию».

Решение Коллегии ЕЭК от 17.06.2025 № 51 «О внесении изменений в перечень стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения требований технического регламента Евразийского экономического союза «О безопасности упакованной питьевой воды, включая природную минеральную воду» (ТР ЕАЭС 044/2017)

Внесены изменения в перечень стандартов для применения и исполнения требований ТР ЕАЭС 044/2017. В позиции 703 в графе 3 слова «СТБ ISO 8467-2009» заменены словами «ГОСТ 34925-2023», позиция 704 исключена, позиция 705 в графе 5 дополнена словами «применяется до 31.12.2026».

Решение Коллегии ЕЭК от 17.06.2025 № 53 «О внесении изменений в перечень международных и региональных (межгосударственных) стандартов, а в случае их отсутствия – национальных (государственных) стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения требований технического регламента Таможенного союза "О безопасности отдельных видов специализированной пищевой продукции, в том числе диетического лечебного и диетического профилактического питания" (ТР ТС 027/2012)»

Внесены изменения в перечень стандартов, необходимых для применения и исполнения требований ТР ТС 027/2012 «О безопасности отдельных видов специализированной пищевой продукции, в том числе диетического лечебного и диетического профилактического питания». Включены новые позиции, некоторые позиции исключены.

Решение Коллегии ЕЭК от 17.06.2025 № 54 «О внесении изменений в Решение Коллегии Евразийской экономической комиссии от 7 февраля 2018 г. № 21»

Внесены изменения в перечни стандартов для исполнения требований технического регламента Таможенного союза «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств» (ТР ТС 029/2012). Включены новые позиции, некоторые позиции исключены.

Федеральный закон от 07.04.2025 № 69-ФЗ «О внесении изменений в статью 16 Закона Российской Федерации "О защите прав потребителей"»

Установлен запрет на навязывание потребителю дополнительных товаров (работ, услуг). Закреплено право потребителя отказаться от оплаты навязанных дополнительных товаров (работ, услуг), а если они оплачены, потребовать от продавца возврата уплаченной суммы за проданные без его согласия дополнительные товары (работы, оказанные дополнительные услуги). Закон вступает в силу с 1 сентября 2025 г.

Федеральный закон от 07.06.2025 № 150-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»

С 1 сентября 2025 г. устанавливаются особенности регулирования применения БАД. БАД назначаются в соответствии со схемами их применения, установленными методическими рекомендациями. В перечень включаются БАДы, отвечающие установленным Правительством РФ критериям качества и эффективности и требованиям технических регламентов ЕАЭС. Запрещается распространение информации, содержащей предложение о розничной торговле БАД, в том числе дистанционным способом, розничная торговля которыми запрещена. Вводится ограничение доступа к сайтам, содержащим такую информацию.

Перечень поручений по итогам заседания Президиума Госсовета «О развитии инфраструктуры для жизни». Утв. Президентом РФ 21.05.2025 № Пр-1116ГС

Поручено в числе прочего представить предложения, касающиеся формирования дифференцированного подхода к установлению и применению са-

нитарно-эпидемиологических требований в отношении строительства и реконструкции зданий образовательных организаций в условиях стесненной городской застройки, в том числе в целях обеспечения возможности реконструкции зданий таких организаций без увеличения площади земельных участков.

Постановление Правительства РФ от 28.03.2025 № 401 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 28 февраля 2019 г. № 224»

Актуализированы Правила маркировки средствами идентификации табачной и никотинсодержащей продукции и организации прослеживаемости такой продукции и сырья для ее производства.

Постановление Правительства РФ от 14.04.2025 № 489 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации»

Установлены особенности лицензирования деятельности в области использования источников ионизирующего излучения (генерирующих) и в области использования возбудителей инфекционных заболеваний и генно-инженерно-модифицированных организмов III и IV степеней потенциальной опасности, осуществляемой в замкнутых системах.

Постановление Правительства РФ от 31.05.2025 № 809 «О проведении на территории Российской Федерации эксперимента по маркировке средствами идентификации растворимых завариваемых напитков, упакованных в потребительскую упаковку, и внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 30 ноября 2024 г. № 1682»

С 1 июня по 31 августа 2025 г. на территории РФ будет проводиться эксперимент по маркировке средствами идентификации кофе, чая, какао-порошка и прочих растворимых завариваемых напитков, упакованных в потребительскую упаковку. Приводится перечень растворимых завариваемых напитков в потребительской упаковке, подлежащих маркировке средствами идентификации.

Постановление Правительства РФ от 31.05.2025 № 811 «Об утверждении Правил маркировки пищевой продукции для питания спортсменов средствами идентификации, особенностях внедрения государственной информационной системы мониторинга за оборотом товаров, подлежащих обязательной маркировке средствами идентификации в отношении пищевой продукции для питания спортсменов, и о проведении на территории Российской Федерации эксперимента по маркировке средствами идентификации пищевой продукции для питания спортсменов»

С 1 сентября 2025 г. устанавливаются правила маркировки пищевой продукции для питания спортсменов.

Определены сроки поэтапного введения обязательной маркировки пищевой продукции для питания спортсменов, требования к участникам оборота продукции, порядок их регистрации в информационной системе мониторинга, требования к сервис-провайдерам, порядок информационного обмена, порядок нанесения средств идентификации, порядок представления участниками оборота сведений в информационную систему мониторинга о вводе в оборот, обороте и о выводе из оборота продукции.

Постановление Правительства РФ от 31.05.2025 № 818 «Об утверждении Правил маркировки отдельных видов сладостей и кондитерских изделий, упакованных в потребительскую упаковку, средствами идентификации и особенностях внедрения государственной информационной системы мониторинга за оборотом товаров, подлежащих обязательной маркировке средствами идентификации, в отношении отдельных видов сладостей и кондитерских изделий, упакованных в потребительскую упаковку»

С 1 сентября 2025 г. устанавливаются правила маркировки отдельных видов сладостей и кондитерских изделий, упакованных в потребительскую упаковку. Определены, сроки поэтапного введения обязательной маркировки, требования к участникам оборота сладостей и кондитерских изделий, порядок информационного обмена участников оборота с информационной системой мониторинга, характеристики средства идентификации, иная информация, актуальная для участников оборота.

Постановление Правительства РФ от 31.05.2025 № 819 «Об утверждении Правил маркировки средствами идентификации отдельных видов товаров для детей и особенностях внедрения государственной информационной системы мониторинга за оборотом товаров, подлежащих обязательной маркировке средствами идентификации, в отношении отдельных видов товаров для детей»

С 1 сентября 2025 г. устанавливаются правила маркировки отдельных видов товаров для детей. Определены сроки поэтапного введения обязательной маркировки продукции, требования к участникам оборота товаров, порядок их регистрации в информационной системе мониторинга, иная информация, актуальная для участников оборота.

Постановление Правительства РФ от 31.05.2025 № 820 «Об утверждении Правил маркировки отдельных видов строительных материалов в потребительской упаковке средствами идентификации и особенностях внедрения государственной информационной системы мониторинга за оборотом товаров, подлежащих обязательной маркировке средствами

идентификации, в отношении отдельных видов строительных материалов в потребительской упаковке»

С 1 сентября 2025 г. устанавливаются правила маркировки отдельных видов строительных материалов в потребительской упаковке. Определены, сроки поэтапного введения обязательной маркировки отдельных видов строительных материалов в потребительской упаковке и иная информация, актуальная для участников оборота.

Постановление Правительства РФ от 31.05.2025 № 829 «Об утверждении Правил заключения, изменения, продления, расторжения соглашения о надлежащем устранении выявленных нарушений обязательных требований»

Определены порядок и условия заключения, изменения, расторжения соглашения о надлежащем устранении выявленных нарушений обязательных требований. Установлены исключения, когда соглашение с контрольным (надзорным) органом не может быть заключено. Срок исполнения соглашения не может превышать 3 лет. Соглашение вступает в силу со дня его согласования органами прокуратуры. В случае исполнения соглашения контрольный (надзорный) орган принимает решение об отмене предписания.

Постановление Правительства РФ от 02.06.2025 № 837 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам прослеживаемости товаров, подлежащих обязательной маркировке средствами идентификации»

С 1 сентября 2025 г. вносятся изменения в некоторые акты Правительства РФ по вопросам прослеживаемости подлежащих обязательной маркировке обувных товаров, парфюмерной продукции, шин, упакованной воды. Вводится понятие «разрешительный документ». Уточняются основания для отказа в регистрации товаров в подсистеме национального каталога маркированных товаров; устанавливаются сроки, при наступлении которых может быть отказано в вводе товаров в оборот в случае. Дополняются сведения, представляемые производителями в информационную систему мониторинга.

Приказ Роспотребнадзора от 10.03.2025 № 171 «О внесении изменений в перечень индикаторов риска нарушения обязательных требований при осуществлении федерального государственного контроля (надзора) в области защиты прав потребителей, утвержденный приказом Роспотребнадзора от 14 сентября 2023 г. № 635»

Внесены изменения в перечень индикаторов риска нарушения обязательных требований при осуществлении федерального государственного контроля (надзора) в области защиты прав потребителей. В перечень включены индикаторы, касающиеся наличия в ГИС МТ в течение календарного месяца сведений о реализации в объекте упакованной питьевой воды, ранее выведенной из оборота. Некоторые индикаторы признаны утратившими силу.

Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 16.12.2024 № 12 «О внесении изменения в санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания", утвержденные постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 № 2»

В новой редакции изложены гигиенические нормативы содержания пестицидов в объектах окружающей среды. Вступает в силу с 01.09.2025.

Постановление Главного государственного санитарного врача по железнодорожному транспорту РФ от 09.04.2025 № 2 «Обеспечение санитарно-эпидемиологической безопасности при перевозке организованных групп детей железнодорожным транспортом в период летней оздоровительной кампании 2025 г.»

Представлен комплекс мер для обеспечения санитарно-эпидемиологической безопасности при перевозке организованных групп детей железнодорожным транспортом в летнюю оздоровительную кампанию 2025 г.

Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 27.03.2025 № 6 «Об утверждении санитарно-эпидемиологических правил и норм СанПиН 2.6.4115-25 «Санитарно-эпидемиологические требования в области радиационной безопасности населения при обращении источников ионизирующего излучения»

Санитарные правила определяют требования радиационной безопасности в соответствии с особенностями условий выполнения работ с отдельными установками, изделиями и материалами, содержащими источники ионизирующего излучения, а также при облучении населения техногенными, медицинскими и природными источниками ионизирующего излучения. СанПиН 2.6.4115-25 действует до 1 сентября 2031 г.

Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 27.03.2025 № 7 «Об утверждении санитарных правил СП 2.2.5.4116-25 «Санитарно-эпидемиологические требования к организации и проведению работ с метанолом»

При работе с метанолом должен проводиться производственный контроль за условиями труда в соответствии с требованиями главы II санитарных правил СП 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда», утвержденных постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 02.12.2020 № 40. Поста-

новление действует с 1 сентября 2025 г. до 1 сентября 2031 г.

Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 17.03.2025 № 1 «Об утверждении санитарных правил СП 2.2.1.4111-25 «Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению безопасности населения при размещении и эксплуатации промышленных объектов, предназначенных для испытания и утилизации методом сжигания зарядов ракетных двигателей на твердом топливе»

Документом определены требования в том числе к помещениям и оборудованию промышленных объектов,, деятельность которых связана с проектированием, размещением, строительством, реконструкцией (техническим перевооружением) и эксплуатацией стендовых комплексов, являющихся источниками периодических выбросов в атмосферный воздух парогазоаэрозольных смесей вредных продуктов сгорания ракетных твердых топлив.

Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 17.03.2025 № 2 «О внесении изменений в санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания", утвержденные постановлением Гл. гос. сан. врача РФ от 28.01.2021 № 2»

Скорректирован ряд химических и биологических факторов производственной среды, нормативы качества и безопасности воды, предельно допустимые уровни физических факторов на рабочих местах, а также гигиенические нормативы по устройству, содержанию и режиму работы организаций воспитания, обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи. Постановление вступает в силу с 1 сентября 2025 г. и действует до 1 марта 2027 г.

МР 2.4.0368-25. 2.4. «Гигиена детей и подростков. Методические рекомендации по организации питания детей в организациях отдыха детей и их оздоровления». Утв. Гл. гос. сан. врачом РФ 21.03.2025

Методические рекомендации содержат обобщенные сведения и рекомендации по обеспечению санитарно-эпидемиологического благополучия при организации питания детей в организациях отдыха детей и их оздоровления с дневным пребыванием, лагерях труда и отдыха, загородных стационарных лагерях. В документе предложены варианты базового меню для разработки региональных типовых меню, учитывающих территориальные, национальные и другие особенности питания населения.

МР 3.5.0372-25. 3.5. «Дезинфектология. Методические рекомендации по организации и проведению дезинфекционных мероприятий на различных объектах в период подготовки и проведения массовых мероприятий. Методические рекомендации». Утв. Гл. гос. сан. врачом РФ 03.04.2025

Методические рекомендации МР 3.5.0372-25 введены взамен МР 3.5.0071-13, Предназначены для специалистов органов и организаций, осуществляющих федеральный государственный санитарно-эпидемиологический контроль (надзор), специалистов организаций, осуществляющих дезинфекционную деятельность, работников объектов, задействованных и привлекаемых к подготовке и проведению массовых мероприятий, а также других заинтересованных юридических лиц и индивидуальных предпринимателей.

МР 3.5.3.0374-25. 3.5.3. «Дератизация. Организация и проведение дератизационных мероприятий. Методические рекомендации». Утв. Гл. гос. сан. врачом РФ 28.04.2025

МР 3.5.3.0374-25 введены взамен МУ 3.5.3.2949-11 «Борьба с грызунами в населенных пунктах, на железнодорожном, водном, воздушном транспорте». Рекомендации содержат принципы и методы организации и проведения дератизационных мероприятий в населенных пунктах, на объектах, транспорте и открытых территориях (в природных биотопах), а также меры безопасности и предосторожности при борьбе с грызунами в соответствии с санитарно-эпидемиологическими требованиями.

МР 2.2.9.0375-25. 2.2.9. «Состояние здоровья работающих в связи с состоянием производственной среды. Анализ причин временной нетрудоспособности с целью определения приоритетных профессиональных групп для разработки медико-профилактических мероприятий. Методические рекомендации». Утв. Гл. гос. сан. врачом РФ 29.04.2025

Методические рекомендации описывают алгоритм оценки заболеваемости работающего населения с временной утратой трудоспособности для определения приоритетных профессиональных групп и проведения адресных медико-профилактических мероприятий, реализации мер по снижению и управлению рисками здоровью работников на уровне муниципального образования и хозяйствующего субъекта.

МР 3.5.2/3.5.5.0367-25. 3.5.2. «Дезинсекция. 3.5.5. Дезинфекционные средства и технологии. Проведение дезинсекционных обработок с применением беспилотных воздушных судов для борьбы с кровососущими комарами. Методические рекомендации». Утв. Гл. гос. сан. врачом РФ 20.03.2025

Документ описывает подходы к выполнению подготовительных работ и обработок с использованием беспилотных воздушных судов, а также реко-

мендации по мерам безопасности и предосторожности при применении беспилотных воздушных судов в борьбе с кровососущими комарами.

МР 2.4.0380-25. 2.4. «Гигиена детей и подростков. Методические рекомендации к санитарным нормам и правилам, регулирующим вопросы обеспечения условий образовательной деятельности, оказания услуг по воспитанию и обучению». Утв. Гл. гос. сан. врачом РФ 30.05.2025

Рекомендации подготовлены в целях единообразной практики применения СП 2.4.3648-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи».

Рекомендации к санитарным правилам, регулирующим вопросы обеспечения условий образовательной деятельности, оказания услуг по воспитанию и обучению.

Разработаны в целях единообразной практики применения отдельных положений СП 2.4.3648-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи». Разъясняются особенности оборудования и планировки территории, проектирования зданий, строений, сооружений, оборудования помещений, предназначенных для организации учебного процесса, и пр.

Письмо Роспотребнадзора от 10.04.2025 № 09-5220-2025-05 «О предоставлении разъяснений»

Даны разъяснения по вопросу отнесения кофеинсодержащих напитков (пепси, кола и др.) к безалкогольным тонизирующим напиткам, попадающим под запрет продажи несовершеннолетним лицам. Безалкогольные напитки, содержащие кофеин в количестве, превышающем 150 мг/л (0,150 мг/дм^3), должны маркироваться надписью «Не рекомендуется употребление детьми в возрасте до 18 лет, при беременности и кормлении грудью, а также лицами, страдающими повышенной нервной возбудимостью, бессонницей, артериальной гипертензией». При отнесении безалкогольных напитков (в том числе пепси, кола и другие) к тонизирующим, попадающим под законодательный запрет продажи несовершеннолетним лицам, необходимо руководствоваться сведениями о содержании кофеина и других тонизирующих веществ, указанными на потребительской упаковке.

Приказ Минздрава России от 29.04.2025 № 258н «Об утверждении порядка проведения экспертизы связи заболевания с профессией, учетной формы извещения об установлении диагноза – острое (хроническое) профессиональное заболевание, уточнении или отмене диагноза – острое (хроническое) профессиональное заболевание, учетной формы медицинского заключения о наличии или об отсутствии профессионального заболевания, порядка учета профессионального заболевания органом государственного санитарно-эпидемиологического контроля (надзора), проводившим расследование обстоятельств и причин возникновения у работника профессионального заболевания, формы протокола заседания комиссии по расследованию случая профессионального заболевания»

Утвержден новый порядок проведения экспертизы связи заболевания с профессией. Экспертиза связи заболевания с профессией проводится в целях установления причинно-следственной связи заболевания, включенного в перечень проф. заболеваний, утвержденный приказом Минздрава от 21 марта 2025 г. № 141н, с профессиональной деятельностью в рамках расследования и учета случаев профессиональных заболеваний. Утверждены: учетная форма № 001-ПЗ-1/у «Извещение об установлении диагноза – острое (хроническое) профессиональное заболевание, уточнении или отмене диагноза – острое (хроническое) профессиональное заболевание»; учетная форма № 001-ПЗ/у «Медицинское заключение о наличии или об отсутствии профессионального заболевания»; порядок учета профессионального заболевания органом государственного санитарно-эпидемиологического контроля (надзора), проводившим расследование обстоятельств и причин возникновения профессионального заболевания; форма протокола заседания комиссии по расследованию случая профессионального заболевания. Приказ вступает в силу с 1 сентября 2025 г. Порядок действует до 1 сентября 2031 г.

Приказ Минздрава России от 08.04.2025 № 172н «Об утверждении Порядка определения степени тяжести вреда, причиненного здоровью человека»

С 1 сентября 2025 г. обновляется порядок определения степени тяжести вреда, причиненного здоровью человека. Признается утратившим силу приказ Минздравсоцразвития РФ от 24.04.2008 № 194н «Об утверждении медицинских критериев определения степени тяжести вреда, причиненного здоровью человека».

Официальная статистическая методология формирования официальной статистической информации об обороте общественного питания. Утв. приказом Росстата от 30.05.2025 № 260

Официальная статистическая информация об обороте общественного питания используется: для характеристики уровня материального благосостояния населения в части потребления различных видов услуг; в качестве информационной базы составления баланса денежных доходов и расходов населения.