

УДК 614.8.01:614.47

ВЛИЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ НА МИКРОБИОТУ ЧЕЛОВЕКА (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

Бушуева Т.В.¹, Рослая Н.А.^{1,2}, Карпова Е.П.¹

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

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

Интерес к изучению взаимодействия микроорганизмов с организмом человека постоянно растет в связи с пониманием их этиологической и патогенетической роли в развитии различных патологических процессов и заболеваний. В настоящее время недостаточно знаний о влиянии вредных производственных факторов на состав и свойства микроорганизмов, колонизирующих слизистые оболочки органов дыхания и кишечника. В работе приводятся данные современных исследований, посвящённых влиянию дисперсного, химического и микробиологического состава аэрозолей на качественный и количественный состав микрофлоры дыхательной системы и желудочно-кишечного тракта.

Цель исследования — провести обзор литературы, включающий аспекты влияния дисперсного, химического, микробиологического состава промышленных аэрозолей на микробиоту дыхательной системы и желудочно-кишечного тракта.

Материалы и методы. Проведен поиск научных статей, посвящённых проблеме влияния промышленных аэрозолей на микробиоту дыхательных путей и кишечника, в наукометрических базах данных за 2018–2025г.

Результаты. Найдено 568 ссылок, в публикацию включены 50 статей. Работы посвящены изучению связей физико-химического, микробного состава аэрозолей с микрофлорой респираторного тракта у здоровых работников и больных пневмокониозом. В публикациях, включённых в обзор, широко представлены исследования, свидетельствующие о значимом влиянии мелкодисперсных твёрдых частиц в составе аэрозолей, на состав и свойства микрофлоры дыхательных путей. Показано, что в последнее время появляются новые данные о влиянии аэрополлютантов на микрофлору кишечника. Продемонстрировано, на примере работников музеев, влияние микробиологического загрязнения рабочих поверхностей на микробиоту респираторного тракта. Результаты исследований

демонстрируют, что у больных пневмокониозом отмечаются характерные дисбиотические изменения, проявляющиеся снижением видового разнообразия, а также его связью с маркерами воспаления и фиброза.

Ключевые слова: производственные факторы и микробиом, промышленные аэрозоли и микробиота дыхательных путей, микрофлора респираторного тракта, микрофлора кишечника, промышленные аэрозоли, аэрозоли металлов

Конфликт интересов: авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Бушуева Т.В., Рослая Н.А., Карпова Е.П. Влияние производственных факторов на микробиоту человека (обзор литературы). Медицина труда и экология человека. 2025; 4: 135 – 155.
doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2025-10407>

Для корреспонденции: Бушуева Татьяна Викторовна – д.м.н., заведующий НПО Лабораторно-диагностических технологий ФБУН «Екатеринбургский медицинский-научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промышленных предприятий» Роспотребнадзора, e-mail: bushueva@ymrc.ru.

IMPACT OF OCCUPATIONAL RISK FACTORS ON HUMAN MICROBIOTA (A LITERATURE REVIEW)

Bushueva T.V.¹, Roslaya N.A.^{1,2}, Karpova E.P.¹

¹Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection among Industrial Workers, Yekaterinburg, Russia

²Ural State Medical University, Yekaterinburg, Russia

Interest in studying the interaction of microorganisms with the human body is constantly growing due to the understanding of their etiological and pathogenetic role in the development of various pathological processes and diseases. Currently, there is insufficient knowledge about the influence of harmful industrial factors on the composition and properties of microorganisms that colonize the mucous membranes of the respiratory organs and intestines.

Materials and methods. A search was conducted for scientific articles on the problem of the effect of industrial aerosols on the microbiota of the respiratory tract and intestines in scientometric databases for 2018-2025.

Results. We found 568 links and 50 articles were included in the publication. The works are devoted to the study of the relationship between the physico-chemical and microbial composition of aerosols and the microflora of the respiratory tract in healthy workers and patients with pneumoconiosis. The publications included in the review widely present studies indicating a significant effect of fine particulate matter in aerosols on the composition and properties of the respiratory tract microflora. It has been shown that new data on the effect of airborne pollutants on the intestinal microflora have been emerging recently. The influence of microbiological contamination of work surfaces on the microbiota of the respiratory tract is demonstrated by the example of museum workers. The research results demonstrate that patients with pneumoconiosis have characteristic dysbiotic changes, manifested by a decrease in species diversity due to its association with markers of inflammation and fibrosis.

Keywords: Occupational factors and the microbiome, respiratory microbiota, airborne microflora in industrial settings, intestinal microflora, industrial aerosols, metal aerosols, respiratory tract

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

Funding: This research received no external funding.

For citation: Bushueva T.V., Roslaya A.A., Karpova E.P. Impact of occupational risk factors on human microbiota (a literature review). Occupational Health and Human Ecology. 2025; 4:135 – 155. doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2025-10407>

For correspondence: Tatiana V. Bushueva – Doct. Sc. (Medicine), Head of the Research and Production Association of Diagnostic Technologies, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, e-mail: bushueva@ymrc.ru.

Индустриальное развитие, нарастающее антропогенное воздействие и недостаточно эффективные меры охраны окружающей среды являются причиной ухудшения экологической обстановки. Одним из значимых последствий этих процессов становится трансформация микробного сообщества как в природных экосистемах, так и в различных биотопах человеческого организма. Количественные и качественные изменения микрофлоры, усиливаемые

воздействием аэрополлютантов, бесконтрольным применением антибиотиков, нерациональным питанием и хроническим стрессом, становятся серьезной проблемой общественного здравоохранения. Дисбаланс микробиоты связывают с повышенным риском аутоиммунных заболеваний, аллергий, ожирения, сахарного диабета, депрессии, а также патологий лёгких и сердечно-сосудистой системы. Осознание роли симбиотических микроорганизмов в поддержании здоровья человека делает изучение и сохранение устойчивого микробного гомеостаза особенно актуальным.

Здоровая микробиота дыхательных путей и кишечника обеспечивает колонизационную резистентность, препятствуя развитию инфекционных заболеваний [1]. Совмещение анализа иммунологических показателей с оценкой состава микробиоты позволяет выявлять адаптационные возможности организма [2, 3]. Нарушение этого баланса, напротив, облегчает колонизацию слизистой верхних дыхательных путей условно-патогенными микроорганизмами, что повышает вероятность инфекционных процессов, особенно у лиц с иммунодефицитами [1, 4, 5].

Цель исследования – провести обзор литературы, включающий аспекты влияния дисперсного, химического, микробиологического состава промышленных аэрозолей на микробиоту дыхательной системы и желудочно-кишечного тракта.

Материалы и методы. Проведен поиск оригинальных исследований и обзоров, посвящённых влиянию факторов рабочей среды на микробиоту респираторного тракта и кишечника, в наукометрических базах данных: PubMed, National Center for Biotechnological Information (NCBI), Web of Science, MEDLINE (2018–2025) и Российском индексе научного цитирования (РИНЦ) (2018-2025). Поиск источников проводили, по ключевым терминам: «производственные факторы и микробиом», «микробиота дыхательных путей и промышленные аэрозоли», «аэрозоли металлов и микробиота». Учитывали публикации с полнотекстовым доступом. Всего было найдено 568 статей, из которых отобрано 50 наиболее релевантных. В статьях, включённых в настоящий обзор, приводятся результаты исследований, посвящённых влиянию физико-химических свойств аэрозолей на микробиоту здоровых работников; отдельные особенности заболеваний медицинских работников в зависимости от воздействующего биологического фактора.

Результаты исследования. За последнее десятилетие накоплено множество данных, подтверждающих существование собственных, относительно стабильных

микробных сообществ дыхательных путей и кишечника. У здорового человека верхние отделы респираторного тракта колонизируются в основном представителями типов *Firmicutes*, *Actinobacteria*, *Bacteroidetes*, *Proteobacteria* и *Fusobacteria*. Микробиом нижних дыхательных путей имеет сходный таксономический состав, где доминируют *Bacteroidetes*, *Firmicutes*, *Proteobacteria*, *Fusobacteria* и *Actinobacteria*, а на уровне родов ведущими представителями считаются *Veillonella*, *Prevotella* [6]. Кишечная микробиота в норме формируется преимущественно за счёт представителей типов *Firmicutes* и *Bacteroidetes*, меньшую долю составляют *Actinobacteria* и *Proteobacteria*. Среди родов и видов ключевое значение имеют *Bacteroides*, *Faecalibacterium*, *Ruminococcus*, *Lactobacillus* и *Bifidobacterium*, которые играют важную роль в метаболизме нутриентов, синтезе витаминов, регуляции иммунного ответа и поддержании барьерной функции слизистой [6].

В процессе дыхания в респираторный тракт постоянно поступает широкий спектр микроорганизмов, однако большинство из них задерживается в верхних отделах благодаря работе мукоцилиарного клиренса, а также действию местных гуморальных факторов (лизоцим, секреторный иммуноглобулин А) и клеточных механизмов защиты (альвеолярные макрофаги, нейтрофилы). Эти барьеры поддерживают относительное постоянство состава микробиоты, предотвращая колонизацию патогенными видами [7, 8].

Одновременно с микроорганизмами в дыхательную систему проникают твёрдые частицы различного размера и химического состава. Аэрополлютанты промышленного происхождения – прежде всего мелкодисперсные частицы (PM_{2,5}), O₃, NO₂, CO, SO₂, а также полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) воздействуют как на эпителиальные клетки слизистой, так и на саму микробиоту [9, 10, 11], способствуя развитию дисбиоза, повышенной воспалительной реактивности и, как следствие, росту риска респираторных и системных заболеваний [5].

Влияние твёрдых частиц в составе аэрозолей на микробиоту. Аэрозоли, содержащие твёрдые частицы, химические соединения и газообразные примеси, остаются ведущим вредным фактором производственной среды на добывающих, обогащательных и металлургических предприятиях. Особое внимание в последние годы уделяется респирабельной фракции аэрозолей – частицам диаметром от 0,001 до 2,5 мкм (PM_{2,5}).

По данным литературы, наиболее изученной проблемой остаётся связь концентрации PM_{2,5} в воздухе с колонизацией *Streptococcus pneumoniae* и

последующим ростом заболеваемости пневмонией [12]. Метаанализы показывают, что даже кратковременное повышение уровня этих частиц коррелирует с увеличением числа госпитализаций по поводу внебольничной пневмонии [13, 14].

Наблюдение Torén K. за работниками, подвергавшимися воздействию аэрозолей, содержащих металлы, и неорганическую пыль показало повышенную смертность от бактериальных, в том числе пневмококковых, пневмоний [15]. Повышенный риск респираторных инфекций установлен у работников, контактирующих с аэрозолями, содержащими железо, хром, никель и минеральные волокна [15, 16, 17].

Новые исследования демонстрируют, что микробиоценоз дыхательных путей реагирует на загрязнение воздуха с некоторой задержкой. Так, в работе Wang L. показано, что воздействие PM_{2,5} за 6 и более дней до исследования оказывает более выраженное влияние на количество микроорганизмов в мокроте, чем экспозиция за 1–3 дня до анализа [18]. Эти данные подтверждают, что эффект загрязнения на микробиоту может быть отложенными и накапливаться со временем.

Твёрдые частицы способны изменять свойства микробных биоплёнок. Эксперимент на культуре эпителиоподобных клеток A548 показал, что под действием PM_{2,5} плотность биоплёнок *Pseudomonas aeruginosa* возрастает, а их адгезия к эпителиальным клеткам усиливается за счёт повышения гидрофобности поверхности бактериальных клеток [19]. В экспериментальных исследованиях *in vivo* установлено, что при воздействии твердых частиц в составе аэрозолей *S. pneumoniae*, *S. aureus* и *P. aeruginosa* образуют более плотные биопленки, а также усиливается адгезия *Pseudomonas* к клеткам респираторного эпителия [19]. Кроме того, наблюдалась повышенная скорость распространения *Streptococcus* из носоглотки в легкие [12]. Wang L. показано, что аэрополлютанты уменьшают бактериальное разнообразие за счет комменсальных микроорганизмов [18]. Кроме того, мелкодисперсные фракции аэрозолей способствуют увеличению обсеменения мокроты грибами рода *Cladosporium* [20].

Влияние аэрополлютантов не ограничивается респираторным трактом. Исследование кишечной микробиоты и метаболомного профиля у китайских работников, хронически подвергавшихся воздействию производственной пыли, выявило уникальные изменения состава, по сравнению со здоровыми контрольными группами [21]. Так производственная среда влияет на баланс кишечной микробиоты, что выражается в снижении разнообразия, изменении состава микрофлоры и увеличении проницаемости кишечника. Эти результаты

подчёркивают необходимость мониторинга кишечной микробиоты как возможного раннего биомаркера профессионально обусловленных заболеваний.

Влияние химического состава аэрозолей на микрофлору человека. Большинство современных исследований сосредоточено на токсическом действии тяжёлых металлов и их способности изменять состав микробиоты. Известно, что бактерии, колонизирующие различные ниши организма, используют доступные микроэлементы для собственного метаболизма, одновременно избегая их токсического эффекта [22]. Конкурентные взаимоотношения между макроорганизмом и его микробиотой за жизненно необходимые металлы в литературе описываются термином «металлостаз» [22]. Цинк (Zn) служит характерным примером такого двойственного влияния. Будучи кофактором множества ферментов, он поддерживает рост и метаболизм *Streptococcus*, однако избыток Zn подавляет образование биоплёнок и снижает вирулентность микроорганизма за счёт ингибирования биосинтеза капсулы и ферментов катаболизма глюкозы [23]. Не менее важно рассматривать комбинированную токсичность металлов [24], так, например, дисбаланс между Zn и марганцем (Mn) влияет на синтез капсульных полисахаридов через фермент фосфоглюкомутазу, формируя более тонкую бактериальную капсулу [25, 26].

Менее изучено влияние микроорганизмов, способных к биотрансформации химических поллютантов. Ни J. и соавт. показали положительную корреляцию между концентрацией высокомолекулярных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в воздухе, и распространённостью представителей рода *Micrococcus*, обладающих способностью разлагать ПАУ [21, 27]. Однако потенциальное воздействие таких микроорганизмов на организм человека остаётся практически неизученным.

Воздействие химических поллютантов часто рассматривается в контексте нарушений кишечной микробиоты человека. Как правило, в исследования включают жителей территорий, расположенных в непосредственной близости от промышленных предприятий [28, 29], а также проводят контролируемые эксперименты на лабораторных животных [30, 31]. Так, влияние свинца на кишечную микробиоту выявлено у работников производства поливинилхлорида: наибольшую чувствительность продемонстрировали роды *Blautia*, *Dorea*, *Streptococcus*, *Collinsella* и *Bifidobacterium*, при этом отмечено снижение доли *Bifidobacterium* и рост численности *Blautia* и *Streptococcus* [32]. Сходные сдвиги описаны у сварщиков, подвергающихся воздействию металлических паров:

зафиксированы признаки повышения кишечной проницаемости и уменьшение разнообразия микробиоты, особенно за счёт снижения *Actinobacteria* [33].

Совокупность этих данных показывает, что аэрозоли с твёрдыми частицами промышленного происхождения влияют не только на эпителий дыхательных путей, но и на устойчивость, разнообразие и метаболическую активность микробиоты дыхательной и пищеварительной систем. Нарушения её состава сегодня рассматриваются как потенциальные биомаркеры профессионального риска и как перспективная мишень для профилактических и терапевтических вмешательств.

Влияние микроорганизмов производственной среды на микробиоту человека. Согласно федеральному законодательству, к опасным факторам производственной среды и трудового процесса относятся не только химические, но и биологические агенты: микроорганизмы-продуценты, живые клетки и споры, содержащиеся в бактериальных препаратах, а также патогенные микроорганизмы – возбудители инфекционных заболеваний. Эти факторы способны изменять состав микробиоты человека и вызывать дисбиотические состояния, что подтверждается многочисленными эпидемиологическими и микробиологическими исследованиями.

Особое внимание уделяется медицинским работникам, среди которых инфекционные заболевания занимают одно из ведущих мест в структуре профессиональной патологии [34]. Наибольшее число исследований посвящено сотрудникам противотуберкулёзных учреждений, где высок риск инфицирования мультирезистентными штаммами *Mycobacterium tuberculosis* [34]. Однако, по данным ряда наблюдений, работники общей лечебной сети заражаются чаще, чем персонал специализированных учреждений [35], что связывают как с недостаточным соблюдением правил противоинфекционной безопасности. При этом критерии оценки биологических факторов профессионального риска, по мнению экспертов, остаются неоднозначными и требуют унификации [36].

Среди источников профессионального инфицирования особое место занимает аэрозольное загрязнение воздуха возбудителями нозокомиальных инфекций. В помещениях медицинских учреждений регулярно выявляют клинически значимые микроорганизмы, такие как *Acinetobacter spp.*, *Stenotrophomonas maltophilia*, а также микроскопические грибы родов *Penicillium*, *Alternaria*, *Cladosporium*, *Aspergillus*, *Acremonium*, *Stemphylium*, *Neurospora* и *Trichoderma* [37, 38]. Их способность длительно сохраняться в среде с высокой плотностью пациентов повышает риск колонизации слизистых оболочек и дыхательных путей персонала.

Проблема усугубляется глобальным ростом антибиотикорезистентности. Внутрибольничные штаммы *Acinetobacter baumannii*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa* и метициллин-резистентный *Staphylococcus aureus* (MRSA) демонстрируют множественную лекарственную устойчивость, что ограничивает терапевтические возможности и увеличивает вероятность хронического носительства у медицинского персонала. Наличие антибиотикорезистентных генов у условно-патогенной микробиоты, персистирующей на коже и слизистых работников здравоохранения, создает дополнительные риски их передачи пациентам и формирования «резервуара» резистентности в больничной экосистеме.

К профессиям с повышенной микробной нагрузкой относят и сотрудников музеев. В одном из крупнейших музеев Румынии микробиологическое исследование воздуха показало, что до 80% штаммов составляли грамположительные бактерии, преимущественно рода *Bacillus* (*B. cereus*), а также *Clostridium* и *Staphylococcus* (*S. epidermidis*, *S. xylosus*, *S. capitis*), а анализ микробиоты носа у музейных работников выявил совпадение штаммов с воздушными изолятами [39].

Воздействию микробных аэрозолей подвергаются и представители других профессий. Так, на машиностроительном предприятии у работников, контактирующих со смазочно-охлаждающими жидкостями, была обнаружена идентичность штаммов *Pseudomonas*, выделенных как из повторно используемых технологических жидкостей, так и из дыхательных путей персонала [40]. Эти данные подтверждают возможность прямой передачи производственной микрофлоры человеку.

Наибольший профессиональный риск микробного воздействия отмечается у работников сельского хозяйства, особенно животноводов [41, 42, 43]. Их постоянный контакт с пылью животноводческих помещений, аэрозолями, содержащими эндотоксины, а также с антибиотиками, используемыми в животноводстве, способствует формированию в их микробиоте устойчивых к антимикробным препаратам штаммов. Отдельные исследования фиксируют увеличение доли *Enterobacteriaceae*, *Clostridium* и дрожжеподобных грибов у фермеров, а также выявление у них генов, кодирующих бета-лактамазы расширенного спектра, что рассматривается как прямое следствие применения антибиотиков в сельскохозяйственном производстве.

Совокупность этих данных подтверждает, что биологические факторы профессиональной среды способны не только изменять состав микробиоты

дыхательных путей и кишечника, но и усиливать циркуляцию антибиотикорезистентных микроорганизмов.

Особенности микрофлоры респираторного тракта у больных пневмокониозом. Пневмокониоз остаётся одной из наиболее распространённых форм профессиональной патологии дыхательной системы. В России профессиональные пылевые заболевания, включая пневмокониоз, составляют до 25–29 % всех профессиональных болезней органов дыхания. Несмотря на давнее обсуждение роли микроорганизмов при пылевых болезнях лёгких, только современные технологии высокопроизводительного секвенирования позволяют переходить от изучения отдельных патогенов к описанию целых микробных сообществ. Метагеномный анализ 16S рРНК в сочетании с методами машинного обучения и нейронных сетей даёт возможность оценивать альфа-разнообразие (видовое богатство внутри одного сообщества) и строить прогнозные модели динамики микробиоты при хроническом воздействии промышленных аэрозолей [44], что имеет важное значение в условиях нарастающих биологических и техногенных угроз [45].

Так, в исследовании Paradnikova S.A. описано биоразнообразие бактериальных сообществ мокроты у шахтёров угольных шахт с хроническим пылевым бронхитом. Автор выявила достоверное снижение альфа-разнообразия и преобладание одного доминирующего рода (*Streptococcus*), что отражает дисбиотический характер изменений микробиоты дыхательных путей при длительном пылевом воздействии [46].

В крупном когортном исследовании Bao X.H. установлено, что частота лёгочных инфекций у пациентов с пневмокониозом достигает 43,3 %. Наиболее частыми возбудителями воспалительных процессов являлись *Klebsiella pneumoniae*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pneumoniae* и *Candida albicans*. Важно, что многие из выделенных штаммов демонстрировали множественную антибиотикорезистентность, что значительно осложняет лечение таких пациентов [47]. Эти данные согласуются с более ранними наблюдениями Lin L. и соавт., которые отметили высокую частоту мультирезистентных изолятов *Enterobacteriaceae* в бронхоальвеолярном лаваже шахтёров, страдающих силикозом [20].

Ма Н. и соавт. провели комплексный анализ микрофлоры слюны, жидкости десневой борозды, носовых мазков и мокроты у больных пневмокониозом. На уровне типов преобладали *Proteobacteria*, *Bacteroidota* и *Firmicutes*. В носовой

полости чаще всего встречались *Proteobacteria*, *Firmicutes* и *Actinobacteria*. На уровне родов доминировали *Neisseria*, *Streptococcus* и *Veillonella* (слюна), *Alcaligenes*, *Porphyromonas*, *Fusobacterium* (жидкость десневой борозды) и *Pseudomonas* (носовые мазки) [48]. Интересно, что микробный состав мокроты оказался ближе к слюнному, чем к микробиому полости носа, что может отражать путь миграции бактерий из верхних дыхательных путей. Авторы показали, что присутствие *Prevotella* и *Actinobacillus* коррелировало с повышением уровня провоспалительного цитокина TNF- α , а *Vibrio* и *Fusobacterium* с увеличением концентрации MMP-1, металлопротеиназы, связанной с разрушением внеклеточного матрикса лёгочной ткани [48].

К аналогичным выводам пришла группа Zhang и соавт. продемонстрировав, что у рабочих горнодобывающих предприятий снижение альфа-разнообразия дыхательной микробиоты сочетается с избыточным ростом *Streptococcus* и *Haemophilus*, что положительно коррелирует с уровнем сывороточного IL-6 и маркерами лёгочного фиброза [49]. Другие авторы с использованием метагеномного секвенирования показали, что длительное воздействие кварцевой пыли изменяет не только состав, но и функциональные метаболические пути микробиоты: усиливается экспрессия генов, связанных с устойчивостью к макролидам и бета-лактамам антибиотикам, что повышает риск хронических инфекций и ограничивает эффективность терапии [50].

Заключение. Профессиональное воздействие аэрополлютантов, тяжёлых металлов и биологических факторов оказывает комплексное влияние на микробиоту дыхательных путей и кишечника. Мелкодисперсные аэрозоли, содержащие частицы РМ 2,5, металлы и органические соединения, снижают альфа-разнообразие микробных сообществ, способствуют формированию биоплёнок и повышают воспалительную реактивность. Биологические факторы усиливают циркуляцию антибиотикорезистентных штаммов и повышают риск инфекций у работников медицинских, сельскохозяйственных и промышленных отраслей. У больных пневмокониозом отмечаются характерные дисбиотические изменения: преобладание доминирующих родов, снижение видового разнообразия и связь с маркерами воспаления и фиброза. Эти данные подчеркивают, что микробиота является чувствительным индикатором профессионального воздействия и потенциальным биомаркером риска хронических заболеваний, что важно для разработки профилактических и терапевтических мер.

Список литературы:

1. Pérez-Cobas A.E., Baquero F., de Pablo R., Soriano M.C., Coque T.M. Altered ecology of the respiratory tract microbiome and nosocomial pneumonia. *Front. Microbiol.* 2022; 12: 709421. DOI: 10.3389/fmicb.2021.709421.
2. Стрижаков Л.А., Бабанов С.А., Будащ Д.С., Лебедева М.В., Байкова А.Г., Вострокнутова М.Ю. и др. Иммунологические особенности и прогнозирование при современных формах профессиональных заболеваний легких. *Медицина труда и промышленная экология.* 2020; 60 (2): 81–88. DOI:10.31089/1026-9428-2020-60-2-81-88.
3. Бушуева Т.В., Рослая Н.А., Вараксин А.Н., Карпова Е.П., Ведерникова М.С., Лабзова А.К. и др. Особенности формирования местного иммунитета верхних дыхательных путей у рабочих чёрной металлургии. *Гигиена и санитария.* 2022; 101 (12): 1499–1504. DOI: 10.47470/0016-9900-2022-101-12-1499-1504.
4. Mucci N., Tommasi E., Chiarelli A., Lulli L. G., Traversini V., Galea R. P. WORKbiota: A systematic review about the effects of occupational exposure on microbiota and workers' health. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2022; 19 (3): 1043. DOI: 10.3390/ijerph19031043.
5. Torén K., Blanc P. D., Naidoo R., Murgia N., Stockfelt L., Schiöler L. Cumulative occupational exposure to inorganic dust and fumes and invasive pneumococcal disease with pneumonia. *Int Arch Occup Environ Health.* 2022; 95 (8): 1797-1804. DOI: 10.1007/s00420-022-01848-6.
6. Santacroce L.; Charitos I.A.; Ballini A.; Inchingolo F.; Luperto P.; De Nitto E. The Human Respiratory System and its Microbiome at a Glimpse. *Biology.* 2020; 9: 318. DOI: 10.3390/biology9100318.
7. Izzotti A., Spatera P., Khalid Z., Pulliero A. Importance of punctual monitoring to evaluate the health effects of airborne particulate matter. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2022; 19 (17): 10587. DOI: 10.3390/ijerph191710587.
8. Zaręba Ł., Piszczatowska K., Dżaman K., Soroczynska K., Motamedi P., Szczepański M.J., et al. The relationship between fine particle matter (PM_{2.5}) exposure and upper respiratory tract diseases. *J. Pers. Med.* 2024; 14(1): 98. DOI: 10.3390/jpm14010098.
9. Li X., Sun Y., An Y., Wang R., Lin H., Liu M. et al. Air pollution during the winter period and respiratory tract microbial imbalance in a healthy young population in Northeastern China. *Environ. Pollut.* 2019 Mar; 246: 972-979. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.12.083.
10. Fournier P., Parola P. Pneumococcal pneumonia among shipyard workers: Inside the features of disease onset. *Travel Med. Infect. Dis.* 2021; 44: 102183. DOI: 10.1016/j.tmaid.2021.102183.
11. Araghi A. The lung microbiome and pneumonia: Where precision medicine meets pulmonology. *Pulmonology.* 2020; 26(6): 333–334. DOI: 10.1016/j.pulmoe.2020.04.005.

12. Yadav M.K., Go Y.Y., Jun I., Chae S.W., Song J.J. Urban particles elevated *Streptococcus pneumoniae* biofilms, colonization of the human middle ear epithelial cells, mouse nasopharynx and transit to the middle ear and lungs. *Sci Rep.* 2020; 10 (1): 5969. DOI: 10.1038/s41598-020-62846-7.
13. Yee J., Cho Y.A., Yoo H.J., Yun H., Gwak H.S. Short-term exposure to air pollution and hospital admission for pneumonia: a systematic review and meta-analysis. *Environ. Health.* 2021 Jan 7; 20(1): 6. DOI: 10.1186/s12940-020-00687-7.
14. Pirozzi C.S., Jones B.E., VanDerslice J.A., Zhang Y. Short-Term Air Pollution and Incident Pneumonia. A Case-Crossover Study. *Ann. Am. Thorac. Soc.* 2018 Apr; 15(4): 449-459. DOI: 10.1513/AnnalsATS.201706-495OC.
15. Torén K., Blanc P.D., Naidoo R.N., Murgia N., Qvarfordt I., Aspevall O., et al. Occupational exposure to dust and to fumes, work as a welder and invasive pneumococcal disease risk. *Occup. Environ. Med.* 2020; 77 (2): 57-63. DOI: 10.1136/oemed-2019-106175.
16. Cassir N., Pascal L., Ferrieux D., Bruel C., Guervilly C., Rebaudet S., et al. Outbreak of pneumococcal pneumonia among shipyard workers in Marseille, France, January to February 2020. *Euro Surveill.* 2020; 25 (11): 2000162. DOI: 10.2807/1560-7917.ES.2020.25.11.2000162.
17. Moitra S., Tabrizi A.F., Henderson L., Khadour F., Osman M., Melenka L., et al. Chronic effects of occupational exposure to mineral fibres and recurrent chest infections in insulators. *ERJ Open Res.* 2022; 8 (2): 00095-2022. DOI: 10.1183/23120541.00095-2022.
18. Wang L., Cheng H., Wang D., Zhao B., Zhang J., Cheng L., et al. Airway microbiome is associated with respiratory functions and responses to ambient particulate matter exposure. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2019; 167: 269-277. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.09.079.
19. Woo S.H., Lee S.M., Park K.C., Park G.N., Cho B., Kim I., Hong S. Effects of fine particulate matter on *Pseudomonas aeruginosa* adhesion and biofilm formation *in vitro*. *Biomed Res Int.* 2018; 6287932. DOI: 10.1155/2018/6287932.
20. Lin L., Yi X., Liu H., Meng R., Li S., Liu X., et al. The airway microbiome mediates the interaction between environmental exposure and respiratory health in humans. *Nat Med.* 2023 Jul; 29(7): 1750-1759. DOI: 10.1038/s41591-023-02424-2
21. Gupta G., Kumar V., Pal A.K. Microbial degradation of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons with emphasis on pyrene. *Polycyclic Aromatic Compounds.* 2019; 39(2): 124-138. DOI: 10.1080/10406638.2017.1293696.
22. Akbari M.S., Doran K.S., Burcham L.R. Metal homeostasis in pathogenic *Streptococci*. *Microorganisms.* 2022; 10 (8): 1501. DOI: 10.3390/microorganisms10081501.
23. Danilova T.A., Danilina G.A., Adzhieva A.A., Vostrova E.I., Zhukhovitskii V.G.,

- Cheknev S.B. Inhibitory effect of copper and zinc ions on the growth of *Streptococcus pyogenes* and *Escherichia coli* biofilms. *Bull. Exp. Biol. Med.* 2020; 169 (5): 648-652. DOI: 10.1007/s10517-020-04946-y.
24. Ding P., Wang X., Li N., Yu S., Zhang Y., Yu J., et al. Effects of combined exposure to heavy metals on lower respiratory flora and its role of lung injury in rats. *Frontiers in Microbiology.* 2025; 16: 1615130. DOI: 10.3389/fmicb.2025.1615130.
25. Bosma E.F., Rau M.H., van Gijtenbeek L.A., Siedler S. Regulation and distinct physiological roles of manganese in bacteria. *FEMS Microbiol. Rev.* 2021; 45 (6): fuab028. DOI: 10.1093/femsre/fuab028.
26. McFarland A.L., Bhattarai N., Joseph M., Winkler M.E., Martin J.E. Cellular Mn/Zn ratio influences phosphoglucosyltransferase activity and capsule production in *Streptococcus pneumoniae* D39. *J. Bacteriol.* 2021; 203 (13): e0060220. DOI: 10.1128/JB.00602-20.
27. Hu J., Bao Y., Zhu Y., Osman R., Shen M., Zhan Z., et al. The preliminary study on the association between PAHs and air pollutants and microbiota diversity. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2020; 79: 321–332. DOI: 10.1007/s00244-020-00757-4.
28. Shao M., Zhu Y. Long-term metal exposure changes gut microbiota of residents surrounding a mining and smelting area. *Sci Rep.* 2020 Mar 10; 10(1): 4453. DOI: 10.1038/s41598-020-61143-7.
29. Ghosh S., Nukavarapu S. P., Jala V. R. Effects of heavy metals on gut barrier integrity and gut microbiota. *Microbiota and Host.* 2024; 2 (1). DOI: 10.1530/MAH-23-0015.
30. Li L., Zhi M., Wang S., Deng J., Cai Q., Feng D. The effect of workplace environment on coal miners' gut microbiota in a mouse model. *Front Microbiol.* 2024 Dec 11; 15: 1453798. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1453798.
31. Zhang Y., Zhang L., Mao L., Fan J., Jiang X., Li N., et al. Intestinal Microbiota-derived Propionic Acid Protects against Zinc Oxide Nanoparticle-induced Lung Injury. *Am J Respir Cell Mol Biol.* 2022 Dec; 67(6): 680-694. DOI: 10.1165/rcmb.2021-05150C.
32. Praditwongsin C., Wongkiew S. Impact of Lead Exposure on Fecal Microbiome in Workers at a PVC Manufacturing Plant in Rayong Province, Thailand. *Environment Asia.* 2024; 17(3): 1-16. DOI: 10.14456/ea.2024.31.
33. Hsiao Y. T., Huang Lai C. Role of Gut Microbiota between Metal Fumes and Intestinal Permeability. *ISEE Conference Abstracts.* 2023; 2023 (1). DOI: 10.1289/isee.2023.MP-094.
34. Петрухин Н.Н. Профессиональная заболеваемость медработников в России и за рубежом (обзор литературы). *Гигиена и санитария.* 2021; 100 (8):845–850. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-8-845-850.
35. Петрухин Н.Н., Логинова Н.Н., Гребеньков С.В., Андреев О.Н. Распространенность внелегочного туберкулеза среди работников медицинской сферы. *Мед. труда и пром. экол.* 2018. 5: 4–7. DOI: 10.31089/1026–9428–2018–5–4–

7.

36. Петрухин Н.Н., Логинова Н.Н., Андреев О.Н., Гребеньков С.В., Воронкова С.В. Роль биофактора в формировании профессиональных заболеваний у работников здравоохранения. Гигиена и санитария. 2018; 97(12): 1231-1234. DOI: 10.18821/0016-9900-2018-97-12-1231-1234.

37. Бадамшина Г.Г., Зиятдинов В.Б., Фатхутдинова Л.М., Кириллова М.А. Микробиота воздушной среды медицинской организации. Здравоохранение Российской Федерации. 2019; 63(6): 308-312. DOI:10.18821/0044-197X-2019-63-6-308-312.

38. Тупикова Д.С., Березин И.И., Жестков А.В., Лямин А.В., Козлов А.В., Сазонова О.В. Оценка качественного состава микромицет в воздухе помещений медицинских организаций стационарного типа. Гигиена и санитария. 2021; 100 (4): 313-317. DOI:10.47470/0016-9900-2021-100-4-313-317.

39. Scarlat I.P., Stroe R., Dițu L.M., Curățiu C., Chiurtu E.R., Stănculescu I., et al. Evaluating the role of the working environment on to skin and upper respiratory tract microbiota of museum workers. Rom. Biotechnol. Lett. 2020; 25 (6): 2103-2106. DOI: 10.25083/rbl/25.6/2103.2106.

40. Wu B.G., Kapoor B., Cummings K.J., Stanton M.L., Nett R.J., Kreiss K., et al. Evidence for environmental-human microbiota transfer at a manufacturing facility with novel work-related respiratory disease. Am. J. Respir. Crit. Care Med. 2020; 202 (12): 1678-1688. DOI: 10.1164/rccm.202001-0197OC.

41. Масыгутова Л.М., Гизатуллина Л.Г. Особенности организации риск-ориентированного медицинского наблюдения работников животноводческих комплексов. Медицина труда и экология человека. 2019; 2 (18): 24-29. DOI: 10.24411/2411-3794-2019-10017.

42. Масыгутова Л.М., Гизатуллина Л.Г., Гайнуллина М.К., Власова Н.В., Рафикова Л.А., Хайруллин Р.У., Аралбаев Х.Ф., Иванова Р.Ш. Видовой состав отдельных штаммов микроорганизмов при развитии болезней верхних дыхательных путей у работников сельскохозяйственного производства. Гигиена и санитария. 2021; 100 (11): 1261-1266. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-11-1261-1266.

43. Гимранова Г.Г., Масыгутова Л.М., Гизатуллина Л.Г. Состояние микробиоты кожи и слизистых оболочек у работников как критерий адаптации к факторам производства. Гигиена и санитария. 2019; 98 (9): 1015-1020. DOI: 10.47470/0016-9900-2019-98-9-1015-1020.

44. Andermann T., Antonelli A., Barrett R.L., Silvestro D. Estimating alpha, beta, and gamma diversity through deep learning. Front Plant Sci. 2022; 13: 839407. DOI: 10.3389/fpls.2022.839407.

45. Гушин В.А., Мануйлов В.А., Макаров В.В., Ткачук А.П. Надлежащая организация системы биобезопасности как средство снижения уязвимости

общества, экономики и государства перед биогенными угрозами. Вестник РГМУ. 2018; (4): 5–21. DOI: 10.24075/vrgmu.2018.054.

46. Paradnikova S.A., Druzhinin V.G., Baranova E.D., Demenkov P.S., Larionov A.V. Specifics of the taxonomic composition of bacterial microflora in the respiratory microbiome of patients with chronic dust bronchitis. *Mol. Genet. Microbiol. Virol.* 2023; 38 (2): 70-78. DOI: 10.3103/S0891416823020076.

47. Bao X.H., Zou R., Yang B., Bi K., Pan S.P. Investigation on risk factors of pneumoconiosis complicated with pulmonary infection. *Journal of Pathogen Biology.* 2023; 18 (1): 77-81. DOI: 10.13350/j.cjpb.230115

48. Ma H., Dong Z., Zhang X., Liu C., Liu Z., Zhou X., et al. Airway bacterial microbiome signatures correlate with occupational pneumoconiosis progression. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2024; 284: 116875. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.116875.

49. Zhang, Y., Yan J., Ren Y., Li L., You X., Xie Y. et al. The role and mechanism of lung microbiota in coal mine dust-induced NLRP3 inflammasome upregulate and lung injury. *Sci Rep.* 2025; 15(1): 22990. DOI: 10.1038/s41598-025-06411-0.

50. Jia Q., Wang H., Wang Y., Xue W., Jiang Q., Wang J. et al. Investigation of the mechanism of silica-induced pulmonary fibrosis: the role of lung microbiota dysbiosis and the LPS/TLR4 signaling pathway. *Science of The Total Environment.* 2024; 912: 168948. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168948.

References:

1. Pérez-Cobas A.E., Baquero F., de Pablo R., Soriano M.C., Coque T.M. Altered ecology of the respiratory tract microbiome and nosocomial pneumonia. *Front. Microbiol.* 2022; 12: 709421. DOI: 10.3389/fmicb.2021.709421.

2. Strizhakov L.A., Babanov S.A., Budash D.S., Lebedeva M.V., Baykova A.G., Vostroknutova M.Yu., Moiseev S.V. Immunological features and prognosis in modern forms of occupational lung diseases. *Occupational health and human ecology.* 2020; 60 (2). DOI:10.31089/1026-9428-2020-60-2-81-88. (In Russ.).

3. Bushueva T.V., Roslaya N.A., Varaksin A.N., Karpova E.P., Vedernikova M.S., Labzova A.K., Gribova Yu.V., Sakhautdinova R.R., Shastin A.S., Gagarina M.S. Features of the development of the mucosal immune system of the upper respiratory tract in ferrous metallurgy workers. *Hygiene and Sanitation.* 2022; 101(12): 1499-1504. DOI: 10.47470/0016-9900-2022-101-12-1499-1504. (In Russ.).

4. Mucci N., Tommasi E., Chiarelli A., Lulli L. G., Traversini V., Galea R. P. WORKbiota: A systematic review about the effects of occupational exposure on microbiota and workers' health. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2022; 19 (3): 1043. DOI: 10.3390/ijerph19031043.

5. Torén K., Blanc P. D., Naidoo R., Murgia N., Stockfelt L., Schiöler L. Cumulative occupational exposure to inorganic dust and fumes and invasive pneumococcal disease

- with pneumonia. *Int Arch Occup Environ Health*. 2022; 95 (8): 1797-1804. DOI: 10.1007/s00420-022-01848-6.
6. Santacroce L.; Charitos I.A.; Ballini A.; Inchingolo F.; Luperto P.; De Nitto E. The Human Respiratory System and its Microbiome at a Glimpse. *Biology*. 2020; 9: 318. DOI: 10.3390/biology9100318.
7. Izzotti A., Spatera P., Khalid Z., Pulliero A. Importance of punctual monitoring to evaluate the health effects of airborne particulate matter. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2022; 19 (17): 10587. DOI: 10.3390/ijerph191710587.
8. Zaręba Ł., Piszczatowska K., Dżaman K., Soroczynska K., Motamedi P., Szczepański M.J., et al. The relationship between fine particle matter (PM_{2.5}) exposure and upper respiratory tract diseases. *J. Pers. Med*. 2024; 14(1): 98. DOI: 10.3390/jpm14010098.
9. Li X., Sun Y., An Y., Wang R., Lin H., Liu M. et al. Air pollution during the winter period and respiratory tract microbial imbalance in a healthy young population in Northeastern China. *Environ. Pollut.* 2019 Mar; 246: 972-979. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.12.083.
10. Fournier P., Parola P. Pneumococcal pneumonia among shipyard workers: Inside the features of disease onset. *Travel Med. Infect. Dis.* 2021; 44: 102183. DOI: 10.1016/j.tmaid.2021.102183.
11. Araghi A. The lung microbiome and pneumonia: Where precision medicine meets pulmonology. *Pulmonology*. 2020; 26(6): 333–334. DOI: 10.1016/j.pulmoe.2020.04.005.
12. Yadav M.K., Go Y.Y., Jun I., Chae S.W., Song J.J. Urban particles elevated *Streptococcus pneumoniae* biofilms, colonization of the human middle ear epithelial cells, mouse nasopharynx and transit to the middle ear and lungs. *Sci Rep*. 2020; 10 (1): 5969. DOI: 10.1038/s41598-020-62846-7.
13. Yee J., Cho Y.A., Yoo H.J., Yun H., Gwak H.S. Short-term exposure to air pollution and hospital admission for pneumonia: a systematic review and meta-analysis. *Environ. Health*. 2021 Jan 7; 20(1): 6. DOI: 10.1186/s12940-020-00687-7.
14. Pirozzi C.S., Jones B.E., VanDerslice J.A., Zhang Y. Short-Term Air Pollution and Incident Pneumonia. A Case-Crossover Study. *Ann. Am. Thorac. Soc*. 2018 Apr; 15(4): 449-459. DOI: 10.1513/AnnalsATS.201706-495OC.
15. Torén K., Blanc P.D., Naidoo R.N., Murgia N., Qvarfordt I., Aspevall O., et al. Occupational exposure to dust and to fumes, work as a welder and invasive pneumococcal disease risk. *Occup. Environ. Med.* 2020; 77 (2): 57-63. DOI: 10.1136/oemed-2019-106175.
16. Cassir N., Pascal L., Ferrieux D., Bruel C., Guervilly C., Rebaudet S., et al. Outbreak of pneumococcal pneumonia among shipyard workers in Marseille, France, January to February 2020. *Euro Surveill*. 2020; 25 (11): 2000162. DOI: 10.2807/1560-7917.ES.2020.25.11.2000162.
17. Moitra S., Tabrizi A.F., Henderson L., Khadour F., Osman M., Melenka L., et al.

Chronic effects of occupational exposure to mineral fibres and recurrent chest infections in insulators. *ERJ Open Res.* 2022; 8 (2): 00095-2022. DOI: 10.1183/23120541.00095-2022.

18. Wang L., Cheng H., Wang D., Zhao B., Zhang J., Cheng L., et al. Airway microbiome is associated with respiratory functions and responses to ambient particulate matter exposure. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2019; 167: 269-277. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.09.079.

19. Woo S.H., Lee S.M., Park K.C., Park G.N., Cho B., Kim I., Hong S. Effects of fine particulate matter on *Pseudomonas aeruginosa* adhesion and biofilm formation *in vitro*. *Biomed Res Int.* 2018; 6287932. DOI: 10.1155/2018/6287932.

20. Lin L., Yi X., Liu H., Meng R., Li S., Liu X., et al. The airway microbiome mediates the interaction between environmental exposure and respiratory health in humans. *Nat Med.* 2023 Jul; 29(7): 1750-1759. DOI: 10.1038/s41591-023-02424-2

21. Gupta G., Kumar V., Pal A.K. Microbial degradation of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons with emphasis on pyrene. *Polycyclic Aromatic Compounds.* 2019; 39(2): 124-138. DOI: 10.1080/10406638.2017.1293696.

22. Akbari M.S., Doran K.S., Burcham L.R. Metal homeostasis in pathogenic *Streptococci*. *Microorganisms.* 2022; 10 (8): 1501. DOI: 10.3390/microorganisms10081501.

23. Danilova T.A., Danilina G.A., Adzhieva A.A., Vostrova E.I., Zhukhovitskii V.G., Cheknev S.B. Inhibitory effect of copper and zinc ions on the growth of *Streptococcus pyogenes* and *Escherichia coli* biofilms. *Bull. Exp. Biol. Med.* 2020; 169 (5): 648-652. DOI: 10.1007/s10517-020-04946-y.

24. Ding P., Wang X., Li N., Yu S., Zhang Y., Yu J., et al. Effects of combined exposure to heavy metals on lower respiratory flora and its role of lung injury in rats. *Frontiers in Microbiology.* 2025; 16: 1615130. DOI: 10.3389/fmicb.2025.1615130.

25. Bosma E.F., Rau M.H., van Gijtenbeek L.A., Siedler S. Regulation and distinct physiological roles of manganese in bacteria. *FEMS Microbiol. Rev.* 2021; 45 (6): fuab028. DOI: 10.1093/femsre/fuab028.

26. McFarland A.L., Bhattarai N., Joseph M., Winkler M.E., Martin J.E. Cellular Mn/Zn ratio influences phosphoglucomutase activity and capsule production in *Streptococcus pneumoniae* D39. *J. Bacteriol.* 2021; 203 (13): e0060220. DOI: 10.1128/JB.00602-20.

27. Hu J., Bao Y., Zhu Y., Osman R., Shen M., Zhan Z., et al. The preliminary study on the association between PAHs and air pollutants and microbiota diversity. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2020; 79: 321–332. DOI: 10.1007/s00244-020-00757-4.

28. Shao M., Zhu Y. Long-term metal exposure changes gut microbiota of residents surrounding a mining and smelting area. *Sci Rep.* 2020 Mar 10; 10(1): 4453. DOI: 10.1038/s41598-020-61143-7.

29. Ghosh S., Nukavarapu S. P., Jala V. R. Effects of heavy metals on gut barrier

- integrity and gut microbiota. *Microbiota and Host*. 2024; 2 (1). DOI: 10.1530/MAH-23-0015.
30. Li L., Zhi M., Wang S., Deng J., Cai Q., Feng D. The effect of workplace environment on coal miners' gut microbiota in a mouse model. *Front Microbiol*. 2024 Dec 11; 15: 1453798. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1453798.
31. Zhang Y., Zhang L., Mao L., Fan J., Jiang X., Li N., et al. Intestinal Microbiota-derived Propionic Acid Protects against Zinc Oxide Nanoparticle-induced Lung Injury. *Am J Respir Cell Mol Biol*. 2022 Dec; 67(6): 680-694. DOI: 10.1165/rcmb.2021-05150C.
32. Praditwongsin C., Wongkiew S. Impact of Lead Exposure on Fecal Microbiome in Workers at a PVC Manufacturing Plant in Rayong Province, Thailand. *Environment Asia*. 2024; 17(3): 1-16. DOI: 10.14456/ea.2024.31.
33. Hsiao Y. T., Huang Lai C. Role of Gut Microbiota between Metal Fumes and Intestinal Permeability. *ISEE Conference Abstracts*. 2023; 2023 (1). DOI: 10.1289/isee.2023.MP-094.
34. Petrukhin N.N. Prevalence of occupational morbidity among healthcare workers in the Russian Federation and abroad (literature review). *Hygiene and Sanitation*. 2021; 100 (8): 845-850. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-8-845-850. (In Russ.).
35. Petrukhin N.N., Loginova N.N., Grebenkov S.V., Andreenko O.N. Prevalence of extrapulmonary tuberculosis among medical workers. *Occupational health and human ecology*. 2018; 5: 4–7. DOI: 10.31089/1026–9428–2018–5–4–7. (In Russ.).
36. Petrukhin N.N., Loginova N.N., Andreenko O.N., Grebenkov S.V., Voronkova S.V. The role of the biofactor in the formation of occupational diseases in healthcare workers. *Hygiene and Sanitation*. 2018, 97(12): 1231-1234. DOI: 10.18821/0016-9900-2018-97-12-1231-1234. (In Russ.).
37. Badamshina G.G., Ziatdinov V.B., Fatkhutdinova L.M., Kirillova M.A. Microbiota of the air environment of the medical organization. (*Health Care of the Russian Federation*. 2019; 63(6): 308-312. DOI: 10.18821/0044-197X-2019-63-6-308-312. (In Russ.).
38. Tupikova D.S., Berezin I.I., Zhestkov A.V., Lyamin A.V., Kozlov A.V., Sazonova O.V. Evaluation of the quality composition of micromycetes in the air of the premises of medical institutions. *Hygiene and Sanitation*. 2021; 100 (4): 313-317. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-4-313-317. (In Russ.).
39. Scarlat I.P., Stroe R., Dițu L.M., Curuțiu C., Chiurtu E.R., Stănculescu I., et al. Evaluating the role of the working environment on the skin and upper respiratory tract microbiota of museum workers. *Rom. Biotechnol. Lett*. 2020; 25 (6): 2103-2106. DOI: 10.25083/rbl/25.6/2103.2106.
40. Wu B.G., Kapoor B., Cummings K.J., Stanton M.L., Nett R.J., Kreiss K., et al. Evidence for environmental-human microbiota transfer at a manufacturing facility with novel work-related respiratory disease. *Am. J. Respir. Crit. Care Med*. 2020; 202 (12): 1678-1688. DOI: 10.1164/rccm.202001-0197OC.

41. Masyagutova L.M., Gizatullina L.G. Peculiarities of organization of risk-oriented medical monitoring of workers of livestock complexes. Occupational health and human ecology. 2019; 2: 24-29. DOI: 10.24411/2411-3794-2019-10017. (In Russ.).
42. Masyagutova L.M., Gizatullina L.G., Gainullina M.K., Vlasova N.V., Rafikova L.A., Khairullin R.U., Aralbaev Kh.F., Ivanova R.Sh. Species composition of certain strains of microorganisms in the development of upper respiratory tract disease in agricultural workers. Hygiene and Sanitation. 2021; 100(11): 1261-1266. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-11-1261-1266. (In Russ.).
43. Gimranova G.G., L.M. Masyagutova, Gizatullina L.G. The state of microbiotes of the skin and mucous membranes of workers as an adaptation criterion to occupational factors (based on the oil extraction industry. Hygiene and Sanitation. 2019; 98(9): 1015-1020. DOI: 10.47470/0016-9900-2019-98-9-1015-1020. (In Russ.).
44. Andermann T., Antonelli A., Barrett R.L., Silvestro D. Estimating alpha, beta, and gamma diversity through deep learning. Front Plant Sci. 2022; 13: 839407. DOI: 10.3389/fpls.2022.839407.
45. Gushchin V.A., Manuilov V.A., Makarov V.V., Tkachuk A.P. The proper structure of a biosafety system as a way of reducing the vulnerability of a society, economy or state in the face of a biogenic threat Bulletin of RSMU. 2018; (4): 5–21. DOI: 10.24075/vrgmu.2018.054. (In Russ.).
46. Paradnikova S.A., Druzhinin V.G., Baranova E.D., Demenkov P.S., Larionov A.V. Specifics of the taxonomic composition of bacterial microflora in the respiratory microbiome of patients with chronic dust bronchitis. Mol. Genet. Microbiol. Virol. 2023; 38 (2): 70-78. DOI: 10.3103/S0891416823020076.
47. Bao X.H., Zou R., Yang B., Bi K., Pan S.P. Investigation on risk factors of pneumoconiosis complicated with pulmonary infection. Journal of Pathogen Biology. 2023; 18 (1): 77-81. DOI: 10.13350/j.cjpb.230115
48. Ma H., Dong Z., Zhang X., Liu C., Liu Z., Zhou X., et al. Airway bacterial microbiome signatures correlate with occupational pneumoconiosis progression. Ecotoxicol Environ Saf. 2024; 284: 116875. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.116875.
49. Zhang, Y., Yan J., Ren Y., Li L., You X., Xie Y. et al. The role and mechanism of lung microbiota in coal mine dust-induced NLRP3 inflammasome upregulate and lung injury. Sci Rep. 2025; 15(1): 22990. DOI: 10.1038/s41598-025-06411-0.
50. Jia Q., Wang H., Wang Y., Xue W., Jiang Q., Wang J. et al. Investigation of the mechanism of silica-induced pulmonary fibrosis: the role of lung microbiota dysbiosis and the LPS/TLR4 signaling pathway. Science of The Total Environment. 2024; 912: 168948. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168948.

Информация об авторах.

Бушуева Татьяна Викторовна, Bushueva T.V. – доктор медицинских наук, заведующий НПО Лабораторно-диагностических технологий ФБУН «Екатеринбургский медицинский-научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» (e-mail: bushueva@ymrc.ru; тел.: 8 (343) 253-14-58; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5872-2001>).

Рослая Наталья Алексеевна, Roslaya N.A. – доктор медицинских наук, доцент кафедры общественного здоровья и здравоохранения ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России, ведущий научный сотрудник НПО Лабораторно-диагностических технологий ФБУН «Екатеринбургский медицинский-научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» (e-mail: naroslaya@gmail.com; тел.: 8 (343) 214-86-61; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9076-9742>).

Карпова Елизавета Павловна, Karпова E.P. – младший научный сотрудник НПО Лабораторно-диагностических технологий ФБУН «Екатеринбургский медицинский-научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» (e-mail: karповаep@ymrc.ru; тел.: 8 (343) 253-14-58; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0125-0063>).

Поступила/Received: 08.04.2025

Принята в печать/Accepted: 25.11.2025