

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2023

Читать
онлайн
Read
onlineЗайцева Н.В.^{1,2}, Кирьянов Д.А.¹, Клейн С.В.^{1,2}, Цинкер М.Ю.^{1,3},
Андрешунас А.М.¹

Распределение твёрдых частиц микроразмерного диапазона в дыхательных путях человека: натурный эксперимент

¹ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 614045, Пермь, Россия;

²Российская академия наук, Отделение медицинских наук, Россия, 109240, Москва, Россия;

³ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», 614990, Пермь, Россия

Введение. Загрязнение атмосферного воздуха как значимая проблема современности обуславливает необходимость разработки основанных на эволюционных математических моделях методов оценки и прогнозирования развития патологических состояний. Адаптация теоретической модели к практическому использованию требует проведения процедуры идентификации и верификации в реальных условиях загрязнения вдыхаемого воздуха пылевыми частицами различного состава.

Цель работы — исследование закономерностей распределения пылевых частиц атмосферного воздуха разного дисперсного, компонентного и морфологического состава в воздухоносных путях человека в условиях натурального эксперимента.

Материалы и методы. Проведена серия исследований в трёх зонах, различающихся по уровню и структуре загрязнений атмосферного воздуха. Дисперсный, компонентный и морфологический состав частиц, присутствующих в атмосферном (вдыхаемом) воздухе, осевших в различных участках дыхательных путей человека, в выдыхаемом воздухе и регистрируемых в крови обследованных, исследован с использованием электронной микроскопии смывов, мазков, биосубстратов.

Результаты. Качество атмосферного воздуха в первой и второй зонах не соответствовало гигиеническим нормативам по содержанию взвешенных веществ, частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$, соединений металлов (до 3,29 ПДК_{Мр}, 3,2 ПДК_{Кс}, 2,91 ПДК_{Сг}) и формировало повышенные коэффициенты опасности марганца, меди, никеля и их соединений, фторидов неорганических, взвешенных веществ (до 5,48 НQас, 3,42 НQch), индексы опасности для органов дыхания и других систем (до 5,48 НIас, 8,59 НIch). Оседание мелких частиц ($PM_{2.5}$ и менее) на различных участках дыхательного тракта неравномерно, они способны проникать в нижние воздухоносные пути и лёгкие человека. В верхних воздухоносных путях более 65% частиц имеют диаметр более 10 мкм. В мокроте нижних дыхательных путей доля частиц $PM_{2.5}$ составила более 60%, из них $PM_{1.5}$ — до 46,7%. В биосубстратах крови преимущественно регистрировались частицы размером менее 1,5 мкм (90,5%), из них до 88,1% частиц имели сферичность 0,9–1.

Ограничения исследования: ограниченная степень точности локализации исследуемых участков дыхательной системы.

Заключение. Общие закономерности оседания пылевых частиц определяются в основном их размерами и морфологией. Компонентный состав не оказывает значимого влияния на закономерности оседания в различных отделах дыхательной системы, но может существенно корректировать виды формируемых патологических состояний организма. Регистрация высокой доли твёрдых частиц $PM_{1.5}$ во вдыхаемом воздухе, в нижних дыхательных путях и крови требует рассмотрения вопроса о гигиеническом нормировании содержания взвешенных частиц $PM_{1.5}$ и менее в атмосферном воздухе населённых мест. Результаты исследования предполагают использовать при численном моделировании процессов накопления функциональных нарушений дыхательной системы, прогнозировании на основе эволюционных математических моделей развития патологических состояний.

Ключевые слова: атмосферный воздух; взвешенные вещества; пылевые частицы; дисперсный состав; компонентный состав; морфологический состав; оседание частиц в воздухоносных путях; здоровье человека; натурный эксперимент

Соблюдение этических стандартов. Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Роспотребнадзора (протокол заседания № 2 от 11.02.2021 г.), проведено согласно общепринятым научным принципам Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (ред. 2013 г.).

Для цитирования: Зайцева Н.В., Кирьянов Д.А., Клейн С.В., Цинкер М.Ю., Андрешунас А.М. Распределение твёрдых частиц микроразмерного диапазона в дыхательных путях человека: натурный эксперимент. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(5): 412–420. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-5-412-420> <https://elibrary.ru/imnzus>

Для корреспонденции: Цинкер Михаил Юрьевич, мл. науч. сотр. ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Роспотребнадзора, 614045, Пермь; мл. науч. сотр. ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», 614990, Пермь. E-mail: cinker@fcfrisk.ru

Участие авторов: Зайцева Н.В. — концепция исследования, организация и проведение натурального эксперимента, редактирование текста, утверждение окончательного варианта статьи; Кирьянов Д.А. — концепция и дизайн исследования, написание текста; Клейн С.В. — выполнение гигиенической оценки, выбор точек проведения эксперимента, написание текста; Цинкер М.Ю. — дизайн исследования, обработка и описание результатов эксперимента, написание текста; Андрешунас А.М. — выполнение гигиенической оценки, описание результатов, написание текста. Все соавторы — ответственность за целостность всех частей статьи.

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

Финансирование. Обработка результатов эксперимента выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2023-0003).

Поступила: 09.03.2023 / Принята к печати: 31.05.2023 / Опубликовано: 20.06.2023

Nina V. Zaitseva^{1,2}, Dmitry A. Kiryanov¹, Svetlana V. Kleyn^{1,2}, Mikhail Yu. Tsinker^{1,3}, Alena M. Andrishunas¹

Distribution of micro-sized range solid particles in the human airways: field experiment

¹Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation;

²Russian Academy of Sciences, Medical Sciences Department, Moscow, 109240, Russian Federation;

³Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation

Introduction. Ambient air pollution is a widespread and pressing issue. This necessitates the development of methods for estimating and predicting progression of pathologies on the base of evolutionary mathematical models. Adaptation of the theoretical model to practice requires identification and verification procedures in real conditions of contamination of inhaled air with dust particles of various compositions.

The purpose of the work was to investigate regularities of distribution of dust particles with a different disperse, component and morphological structure in the human airways after inhalation from ambient air. The study involved performing a field experiment.

Materials and methods. We accomplished several investigations in 3 zones with different levels and structures of ambient air pollution. Disperse, component, and morphological structures of particles occurring in ambient (inhaled), deposited in various sections of the human airways, in exhaled air and blood were examined by electronic microscopy.

Results. Air quality in zones 1 and 2 did not comply with hygienic standards for suspended particles, PM_{10} , $PM_{2.5}$, metal compounds, etc. (up to 3.29 MPCm.s., 3.2 MPCav.s., 2.91 MPCav.y.) and formed increased hazard quotient for manganese, copper, nickel and their compounds, inorganic fluorides, suspended particles (up to 5.48 HQac, 3.42 HQch), respiratory and other hazard indices (up to 5.48 HIac, 8.59 HIch). The degree of sedimentation of small particles ($PM_{2.5}$ or less) in different parts of the respiratory tract is uneven, they are able to penetrate into the lower airways and lungs of humans. More than 65% of all the particles deposited in the upper airways had a diameter bigger than 10 μ m. $PM_{2.5}$ accounted for more than 60% in sputum in the lower airways and the share of $PM_{1.5}$ reached 46.7%. Particles smaller than 1.5 μ m (90.5%) were predominantly recorded in blood biosubstrates, of which up to 88.1% of the particles had a sphericity of 0.9–1.0.

Limitations. Limited degree of precision of location of the examined sections in the respiratory system.

Conclusion. Common deposition regularities are mostly determined by sizes and morphology of dust particles. The component structure of inhaled air has practically no effects on regularities of particle deposition in various sections of the respiratory system; however, it can have substantial influence on types of pathologies progressing in the body. High shares of $PM_{1.5}$ identified in inhaled air, the lower airways and blood require considering levels of $PM_{1.5}$ and smaller particles in ambient air in settlements to be covered by hygienic standards. In future, the study results will be used in numeric modelling of accumulation of functional respiratory disorders and associated pathologies of other organs and systems and in predicting development of pathologies based on evolution mathematical models.

Keywords: ambient air; particulate matter; dust particles; disperse structure; component structure; morphological structure; particle deposition in the airways; human health; field experiment

Compliance with ethical standards. The study was approved by the local ethical committee of the Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies (meeting protocol No. 2 dated 11.02.2021), and the Helsinki Declaration of the World Medical Association (as amended 2013) was carried out.

For citation: Zaitseva N.V., Kiryanov D.A., Kleyn S.V., Tsinker M.Yu., Andrishunas A.M. Distribution of micro-sized range solid particles in the human airways: field experiment. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(5): 412–420. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-5-412-420> <https://elibrary.ru/immzus> (In Russ.)

For correspondence: Mikhail Yu. Tsinker, junior research associate of the department of the department of the mathematical modeling of systems and processes of the Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation; junior research associate of the department of the department of the mathematical modeling of systems of the Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation. E-mail: cinker@fcrisk.ru

Information about the authors:

Zaitseva N.V., <https://orcid.org/0000-0003-2356-1145>
Kiryanov D.A., <https://orcid.org/0000-0002-5406-4961>
Kleyn S.V., <https://orcid.org/0000-0002-2534-5713>
Tsinker M.Yu. <https://orcid.org/0000-0002-2639-5368>
Andrishunas A.M., <https://orcid.org/0000-0002-0072-5787>

Contribution: Zaitseva N.V. – the study concept, organizing and accomplishing a field experiment, text editing, approval of the final version of the article; Kiryanov D.A. – the study concept and design, writing; Kleyn S.V. – hygienic assessment, selecting points for accomplishing a field experiment, writing; Tsinker M.Yu. – the study concept and design, experiment data analysis, description of the results, writing; Andrishunas A.M. – hygienic assessment, description of the results, writing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the article.

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

Acknowledgement. The processing of the results of the experiment was carried out with the support of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the implementation of basic scientific research (project FSNM-2023-0003).

Received: March 9, 2023 / Accepted: May 31, 2023 / Published: June 20, 2023

Введение

Качественная и количественная характеристика атмосферного воздуха – важнейшие инструменты оценки безопасности окружающей среды. В современных отечественных и зарубежных научных публикациях приводятся многочисленные доказательства негативного влияния на состояние здоровья населения загрязнения атмосферного воздуха химическими веществами, в том числе твёрдыми пылевыми частицами разного дисперсного, компонентного и морфологического состава [1–4]. В частности, показано, что взвешенные частицы, попадая с вдыхаемым воздухом в организм, оседают на стенках воздухоносных путей и лёгочной ткани, обладают раздражающим, токсичным, фиброгенным действием и являются одной из причин возникновения и (или) обострения различных болезней [5–7].

В ряде исследований механизмы повреждения воздухоносных путей и лёгочных альвеол в результате влияния пылевых частиц описываются исключительно как сложные и зачастую необратимые процессы, характеризующиеся накоплением морфофункциональных нарушений, и существенно неоднородные во времени [1, 5, 7, 8].

Загрязнение атмосферного воздуха – один из приоритетных факторов риска для здоровья человека, действующий на протяжении всей жизни. Это обусловило необходимость разработки основанных на эволюционных математических моделях методов прогнозирования развития патологических состояний [9]. В рамках концепции эволюционного моделирования для оценки и прогнозирования влияния аэрогенных факторов на риск развития нарушений дыхательной системы человека выполнено математическое описание модели воздухоносных путей и лёгких, а также проведена её численная реализация [10]. Постановка задачи математического моделирования процесса дыхания представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающих движение воздуха по воздухоносным путям. Воздух при этом рассматривается как многофазная многокомпонентная смесь газов и пылевых частиц различного дисперсного состава. Модель позволяет определять состав пылегазовой смеси в различных участках воздухоносного тракта, оценивать оседание частиц на стенках, анализировать интенсивность поступления веществ в организм, а также прогнозировать изменения параметров функционального состояния элементов дыхательной системы. Наиболее подробно выполнено численное исследование движения воздуха и оседания твёрдых частиц в носовой полости человека [11], трахее и крупных бронхах [12], рассмотрены подходы к моделированию течения воздуха в лёгких [13]. Вместе с тем разрабатываемая модель и полученные предварительные результаты носят скорее теоретический характер и позволяют проводить только качественные оценки процессов оседания пылевых частиц на различных участках воздухоносных путей. Адаптация теоретической модели для практического использования в задачах оценки и прогнозирования негативных последствий для здоровья человека требует проведения процедуры идентификации и верификации, в основе которой лежат натурные измерения в реальных условиях загрязнения вдыхаемого воздуха пылевыми частицами различного дисперсного, компонентного и морфологического состава.

Цель работы – исследование закономерностей распределения пылевых частиц атмосферного воздуха разного дисперсного, компонентного и морфологического состава в воздухоносных путях человека в условиях натурального эксперимента.

Материалы и методы

Эксперимент по оценке дисперсного, компонентного и морфологического состава пылевых фракций атмосферного (вдыхаемого) и выдыхаемого воздуха, образцов смывов, мазков и мокроты со слизистой оболочки различных участков дыхательных путей человека при естественном дыхании

проводился в условиях городской среды с разнородным и разноуровневым пылевым загрязнением атмосферного воздуха, возникшим вследствие природных и техногенных причин. Испытания проводились в соответствии с принципами волонтерского движения с оформленным соответствующим образом добровольным согласием участников. Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Роспотребнадзора (протокол заседания № 2 от 11.02.2021 г.), проведено согласно общепринятым научным принципам Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (ред. 2013 г.).

Экспериментальное исследование проводилось в трёх зонах (точках) с различным уровнем экспозиции и дисперсным, компонентным и морфологическим составом пылевых фракций в атмосферном воздухе: точка 1 соответствовала зоне преобладающего влияния крупного металлургического предприятия; точка 2 – зоне влияния крупной ТЭЦ; точка 3 располагалась в зоне относительного санитарно-эпидемиологического благополучия по качеству атмосферного воздуха.

Выбор зон проведения исследований был обусловлен наличием выраженных гигиенических и экологических проблем качества атмосферного воздуха на территории жилых массивов города – участника эксперимента федерального проекта «Чистый воздух» в местах наибольшего влияния крупного металлургического предприятия и ТЭЦ [14]. Для выбора точек проведения исследований проводился гигиенический анализ качества атмосферного воздуха на соответствие СанПиН 1.2.3685–21* по результатам расчётов рассеивания загрязняющих веществ (с использованием актуальной базы данных по источникам выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (2020 г.) и программного модуля УПРЗА «Эколог-город» 4.60.1), верифицированных данными инструментальных исследований на постах мониторинга качества атмосферного воздуха за 2019–2021 гг.

Для учёта влияния погодных-климатических параметров окружающей среды (температура, влажность) исследования проводились в холодный и тёплый периоды года. Всего эксперимент состоял из шести серий измерений в трёх обозначенных зонах. Каждое исследование состояло в одновременном отборе проб атмосферного и выдыхаемого воздуха в течение 30 мин: в процессе эксперимента каждый испытуемый вдыхал воздух через нос, выдыхал через рот в прибор для сбора пылевых частиц. Прибор состоял из фильтродержателя ИРА-20-2 (закрытого типа с рабочей площадью фильтра 20 см²), фильтра АФА-ВП-20 (на котором оседали частицы), шланга и газового счётчика, измеряющего объём выдыхаемого воздуха. Перед началом каждого исследования выполнялась санация носовой полости. После окончания отбора проб воздуха каждому испытуемому проводили смыв из носовых ходов путём промывания полостей физраствором (5 мл), отбирали мазок со слизистой оболочки носоглотки стерильным зондом, выполняли сбор мокроты при простом и натужном откашливании, осуществляли отбор проб крови по 1–2 мл в стерильную пробирку с последующим изготовлением мазков для электронной микроскопии. Отобранные образцы исследовали для определения дисперсного, компонентного и морфологического состава присутствующих взвешенных частиц, на основе чего выполняли оценку распределения осевших твёрдых пылевых частиц в различных участках дыхательной системы. Исходили из предположения, что образцы смывов из носовых ходов характеризуют оседание частиц в начальном участке дыхательных путей (носовой полости), образцы мазков со слизистой оболочки носоглотки – оседание в более глубоком участке дыхательного трак-

* Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 12.01.2023 г.).

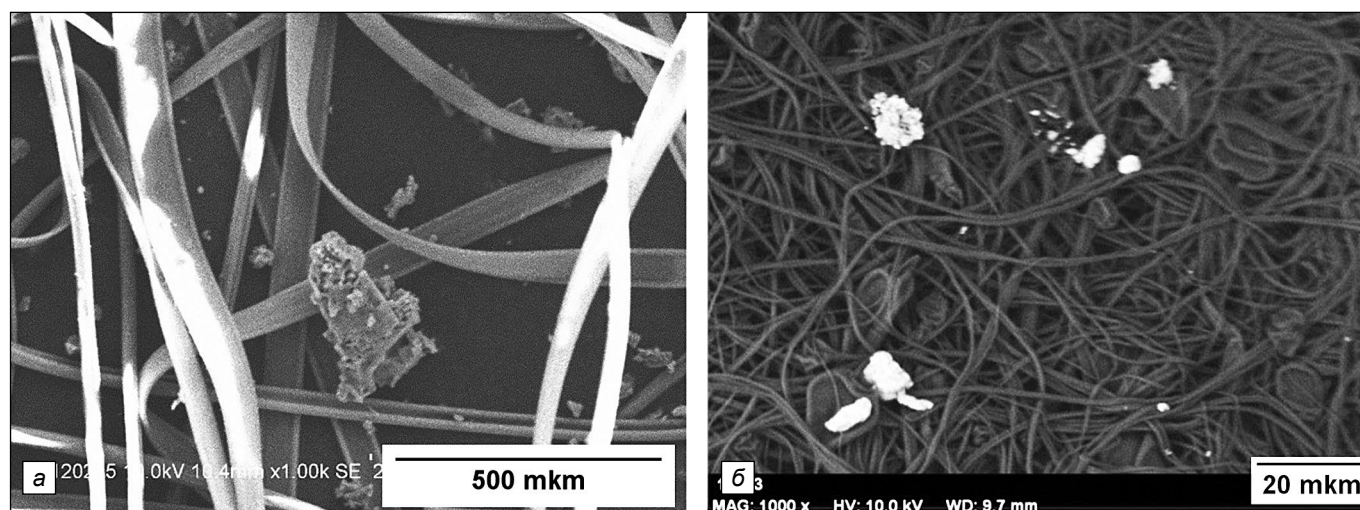


Рис. 1. Микрофотографии поверхностей фильтров, содержащих пылевые частицы, присутствующие в атмосферном (вдыхаемом) (а) и выдыхаемом (б) воздухе.

Fig. 1. Micrographs of filter surfaces containing dust particles present in atmospheric (inhaled) (a) and exhaled (b) air.

та (глотке), а исследование мокроты при откашливании без стимуляции и со стимуляцией отражает оседание частиц в средних и нижних отделах дыхательных путей соответственно. В крови исследовали только дисперсный и морфологический составы твёрдых частиц. Результаты анализов крови отражали степень проникновения взвешенных частиц через мелкие альвеолы в поток крови. Исследование образцов для определения дисперсного, компонентного и морфологического состава пылевых частиц проводили на основе анализа изображений, полученных методом растровой электронной микроскопии (марка микроскопа JSM-63090LV). Анализ изображений для получения количественных характеристик проведён в программе ImageJ-Fiji (модуль AnalyzeParticles).

Результаты

Гигиеническая оценка качества атмосферного воздуха исследуемых территорий на соответствие нормативам, установленным СанПиН 1.2.3685–21, показала, что в точках проведения эксперимента (по расчётным данным, верифицированным результатами инструментальных измерений) превышения регистрировались по следующим веществам:

- зона 1: взвешенные вещества (2,83 ПДК_{мр}; 1,68 ПДК_{сг}), марганец и его соединения (1,79 ПДК_{сг}), меди оксид (1,29 ПДК_{сг}), хром (в пересчёте на хрома (VI) оксид) (2,91 ПДК_{сг});
- зона 2: взвешенные вещества (3,29 ПДК_{мр}; 1,36 ПДК_{сг}), пыль неорганическая: 70–20% SiO₂ (1,52 ПДК_{мр}), марганец и его соединения (1,08 ПДК_{сг}), меди оксид (3,42 ПДК_{сг}), хром (в пересчёте на хрома (VI) оксид) (1,36 ПДК_{сг}), фториды неорганические плохо растворимые (1,02 ПДК_{сг}).

При отборе проб в зоне 1 в холодный период года регистрировались превышения по взвешенным веществам до 1,2 ПДК_{сс}, по взвешенным частицам РМ₁₀ – до 1,65 ПДК_{сс}, РМ_{2,5} – до 1,7 ПДК_{сс}, в тёплый период года – по взвешенным веществам до 2,73 ПДК_{сс}, по взвешенным частицам РМ₁₀ – до 3,2 ПДК_{сс}, РМ_{2,5} – до 1,2 ПДК_{сс}. В зоне 2 в холодный период регистрировались превышения по взвешенным веществам до 1,13 ПДК_{сс}, по взвешенным частицам РМ₁₀ – до 1,38 ПДК_{сс}, РМ_{2,5} – до 1,42 ПДК_{сс}, в тёплый период – по взвешенным веществам до 1,3 ПДК_{сс}, по взвешенным частицам РМ₁₀ – до 1,14 ПДК_{сс}, РМ_{2,5} – до 1 ПДК_{сс}.

Гигиеническая оценка качества атмосферного воздуха в зоне с наиболее низкой пылевой нагрузкой для определения соответствия гигиеническим нормативам показала

отсутствие превышений предельно допустимых концентраций всех исследуемых веществ в холодный и тёплый периоды года.

По результатам оценки риска для здоровья населения установлено, что при остром ингаляционном неканцерогенном воздействии в точках исследования по взвешенным веществам формируются повышенные уровни коэффициентов опасности, классифицируемые как высокие (зона 1 – 4,72 НQ_{ас}, зона 2 – 5,48 НQ_{ас}). Индексы опасности формирования патологии со стороны органов дыхания в зоне 1 составляют 4,72 НI_{ас}, в зоне 2 – 5,48 НI_{ас} и классифицируются как нарастающие.

Хроническое ингаляционное неканцерогенное воздействие исследуемых химических веществ формирует нарастающие (1,1–3 НQ) и высокий (более 3 НQ) уровни риска для здоровья, выраженные коэффициентами опасности по пяти веществам. В зоне 1 это марганец и его соединения (1,79 НQ_{сг}), меди оксид (1,29 НQ_{сг}), никеля оксид (1,46 НQ_{сг}), взвешенные вещества (1,69 НQ_{сг}), в зоне 2 – марганец и его соединения (1,08 НQ_{сг}), меди оксид (3,42 НQ_{сг}), никеля оксид (2,29 НQ_{сг}), фториды неорганические плохо растворимые (2,36 НQ_{сг}), взвешенные вещества (1,54 НQ_{сг}). Установленные уровни хронической экспозиции формируют повышенные уровни индексов опасности: в зоне 1 – в отношении возникновения заболеваний органов дыхания (6,23 НI_{сх}), нервной (1,79 НI_{сх}), кроветворной (1,46 НI_{сх}) систем, в зоне 2 – в отношении органов дыхания (8,59 НI_{сх}), нервной (1,08 НI_{сх}), кроветворной (2,29 НI_{сх}), костно-мышечной (2,36 НI_{сх}) систем.

Исследование компонентного состава пыли в атмосферном воздухе методом электронной микроскопии показало, что в зонах эксперимента 1 и 2 регистрируются твёрдые частицы сравнительно обширного перечня: соединения натрия, магния, железа, кремния, алюминия, калия, серы, фосфора, кальция, меди, титана, свинца, серебра, фтора. На рис. 1 представлены микрофотографии поверхности фильтра, содержащего пылевые частицы, присутствующие в атмосферном (вдыхаемом) (см. рис. 1, а) и выдыхаемом (см. рис. 1, б) воздухе.

Компонентный состав твёрдых частиц вдыхаемого воздуха в зоне 1, где превалирует влияние крупного металлургического предприятия, в холодный и тёплый время года различался незначительно: основную долю твёрдых частиц в холодный период составляли соединения меди, кремния, алюминия, железа (60,1%), в тёплый период – соединения кремния, железа, алюминия, магния (35,1%) (см. таблицу).

Элементный состав частиц, присутствующих в атмосферном воздухе, в точках проведения экспериментальных исследований, %
Element composition of particles presented in atmospheric air at the points of field experiment, %

Загрязняющее вещество Pollutant	Холодное время года / Cold season			Тёплое время года / Warm season		
	Зона 1 Zone 1	Зона 2 Zone 2	Зона 3 Zone 3	Зона 1 Zone 1	Зона 2 Zone 2	Зона 3 Zone 3
Натрий (Na) / Sodium (Na)	0.04	11.9	—	1.47	0.45	—
Магний (Mg) / Magnesium (Mg)	0.06	—	—	5.07	0.34	—
Железо (Fe) / Iron (Fe)	3.12	12.68	—	6.50	—	—
Кремний (Si) / Silicon (Si)	17.98	16.24	49.58	17.29	25.06	51.54
Алюминий (Al) / Aluminium (Al)	12.95	17.77	—	6.26	24.65	—
Калий (K) / Potassium (K)	0.41	6.56	—	1.72	8.03	—
Сера (S) / Sulfur (S)	0.84	10.24	—	3.50	—	—
Фосфор (P) / Phosphorus (P)	1.27	10.85	—	0.62	—	—
Кальций (Ca) / Calcium (Ca)	1.51	4.51	—	3.54	—	—
Медь (Cu) / Copper (Cu)	26.09	—	—	—	—	—
Титан (Ti) / Titanium (Ti)	—	—	—	1.22	—	—
Свинец (Pb) / Lead (Pb)	—	—	—	0.41	—	—
Серебро (Ag) / Silver (Ag)	—	—	—	0.22	—	—
Фтор (F) / Fluorine (F)	—	—	—	—	6.68	—
Кислород (O) / Oxygen (O)	35.73	9.27	51.42	52.18	34.78	48.46

Компонентный состав твёрдых частиц в атмосферном воздухе в зоне влияния объекта теплоэнергетики (зона 2) в холодный период был более широким по сравнению с тёплым периодом года. Так, основную долю твёрдых частиц, содержащихся в атмосферном (вдыхаемом) воздухе в холодный период, составляли соединения алюминия, кремния, железа, натрия (58,6%). В тёплый период состав частиц был несколько иным, но при этом кремний и алюминий остались приоритетными по количественному содержанию и составили почти 50% от общего количества частиц. Исследование компонентного состава пыли в зоне 3 показало, что в тёплый и холодный периоды года порядка 50% химических веществ в атмосферном воздухе приходилось на кремний.

Компонентный состав выдыхаемого воздуха в обеих зонах исследования в холодный и летний периоды изменялся незначительно по сравнению с вдыхаемым атмосферным воздухом. По-прежнему основную долю твёрдых частиц составляли соединения кремния, железа, кальция, алюминия, при этом количество частиц в выдыхаемом воздухе за счёт их оседания в разных участках воздухоносных путей уменьшилось более чем на 50% и составило 23,1–30% (зона 1) и 11,4–19,6% (зона 2).

Результаты исследования компонентного состава показали, что каждая зона в соответствии с типом приоритетного источника загрязнения атмосферного воздуха характеризуется соответствующим набором твёрдых частиц химических соединений, и при движении по дыхательным путям компонентный состав пылегазовой смеси существенно не изменяется и не оказывает значимого влияния на закономерности оседания твёрдых частиц в различных отделах дыхательной системы.

Результаты экспериментального исследования дисперсного состава вдыхаемого (атмосферного) и выдыхаемого воздуха для всех серий измерений представлены на рис. 2.

Представленные диаграммы со структурой дисперсного состава пылевых частиц во вдыхаемом воздухе отражают как особенности пылевого загрязнения атмосферного воздуха в каждой зоне, так и общие черты и закономерности. В структуре твёрдых частиц во вдыхаемом воздухе соотношение

фракций соответствует экспоненциальному распределению с выраженным смещением в сторону мелких фракций (до 2,5 мкм). Так, например, в зоне 1 (см. рис. 2, а) в холодный период года доля частиц $PM_{2,5}$ составила 69,4%, из них 54,8% соответствовали размеру менее 1,5 мкм. Схожая картина наблюдалась для остальных исследуемых зон как в холодный, так и в тёплый периоды. Кроме того, в зоне 1 смещение доли пылевых частиц в структуре в сторону мелких фракций было более выражено в холодный период года: фракции пылевых частиц размером менее 2,5 мкм составили 69,4%, в летний период — 58,6%; в зоне 2, напротив, в тёплый период $PM_{2,5}$ составляли 48,5%, в холодный период — 24,1%.

Сравнительный анализ пылевых фракций выдыхаемого (атмосферного) и выдыхаемого воздуха показал, что в большинстве исследований (см. рис. 2, а–г, е) наблюдалось значимое отличие в структуре дисперсного состава. За счёт физиологических процессов неравномерного оседания в различных отделах дыхательной системы твёрдых частиц наблюдалось перераспределение в их фракционной структуре. В отличие от вдыхаемого воздуха, где максимум распределения приходился на мелкие фракции (частицы менее 2,5 мкм составляли 24,1–69,9%), в выдыхаемом воздухе максимальная доля более крупных частиц (частицы более 10 мкм составляли 10,9–52,3%). Наиболее выражена эта закономерность в зонах с повышенной пылевой нагрузкой (см. рис. 2, а–г). В зоне относительного санитарно-эпидемиологического благополучия такая закономерность менее выражена.

Исследования образцов смывов из носовых ходов, мазков из носоглотки и мокроты из бронхов при откашливании без стимуляции и со стимуляцией позволили оценить варианты распределения частиц по отдельным участкам дыхательной системы. На рис. 3 представлены усреднённые структуры дисперсного состава частиц, а также диапазоны минимального и максимального значений долей их содержания, определённые во всех исследованиях.

В смывах, отобранных в начальном участке воздухоносных путей (носовой полости), обнаружены преимущественно крупные частицы пыли (более 10 мкм), доля ко-

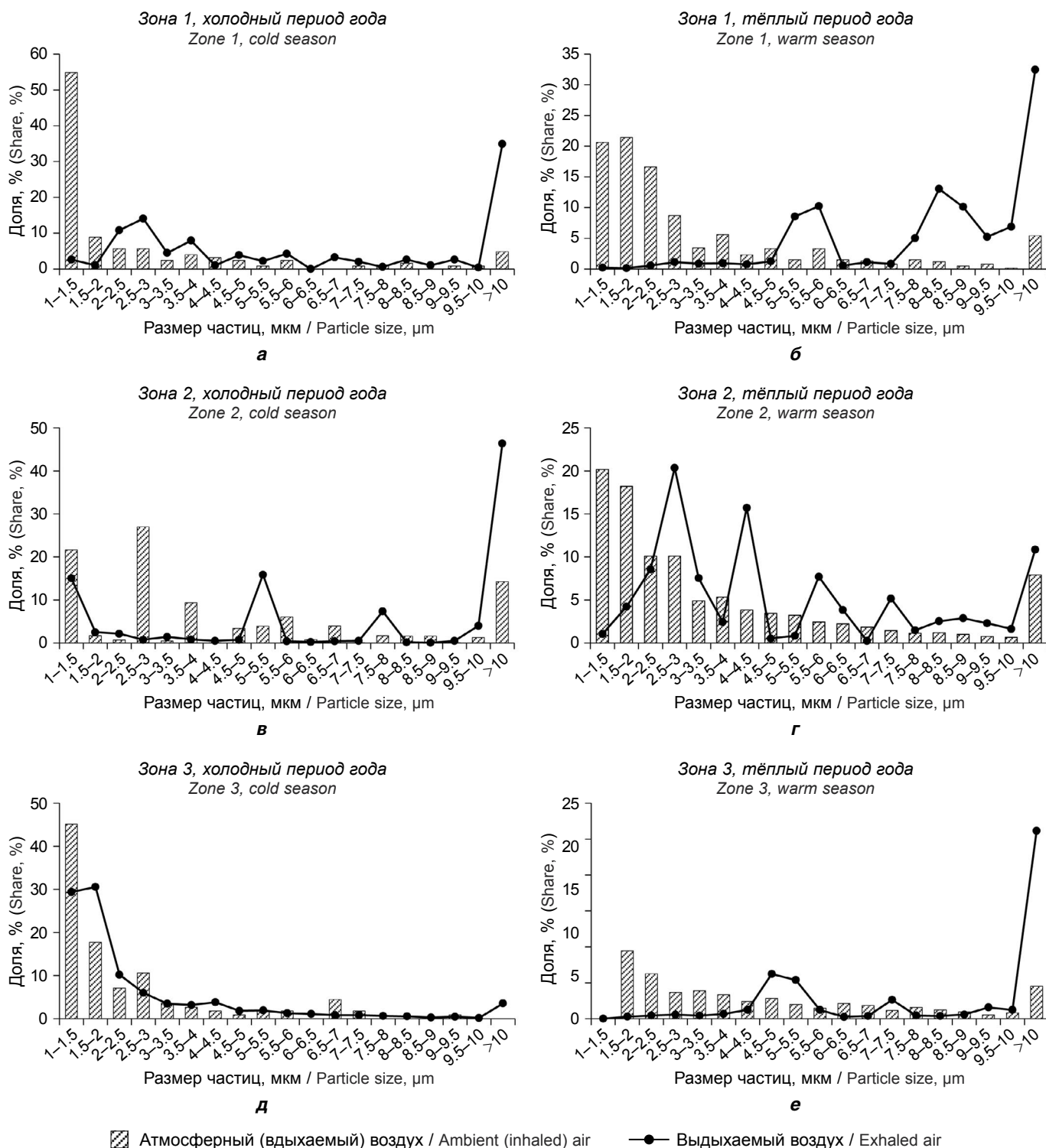


Рис. 2. Структура дисперсного состава частиц в атмосферном (вдыхаемом) и выдыхаемом воздухе в зонах натурального эксперимента в исследуемые периоды года.

Fig. 2. Disperse structures of particles occurring in ambient (inhaled) and in exhaled air in the zones of field experiment during the study periods of the year.

торых в среднем составила 65,6% от общего количества. Доля частиц менее 1,5 мкм составила в среднем 3,77% (см. рис. 3, а). По мере продвижения вдыхаемого воздуха по дыхательным путям уменьшается доля крупных частиц и увеличивается доля более мелких. Так, в носоглотке доля частиц более 10 мкм в среднем составляла 25,9% (доля частиц менее 1,5 мкм – 15,7%) (см. рис. 3, б). В средних и нижних участках бронхов доля частиц диаметром более

10 мкм составляла 10,9 и 10,2% соответственно, частиц менее 1,5 мкм – 26,6 и 30,97% соответственно (см. рис. 3, в, г). В образцах мокроты, полученной при откашливании со стимуляцией, характеризующих оседание в нижних дыхательных путях (см. рис. 3, з), доля частиц диаметром менее 2,5 мкм составила 56,8%.

Анализ результатов электронной микроскопии мазков крови для определения дисперсного состава твёрдых частиц

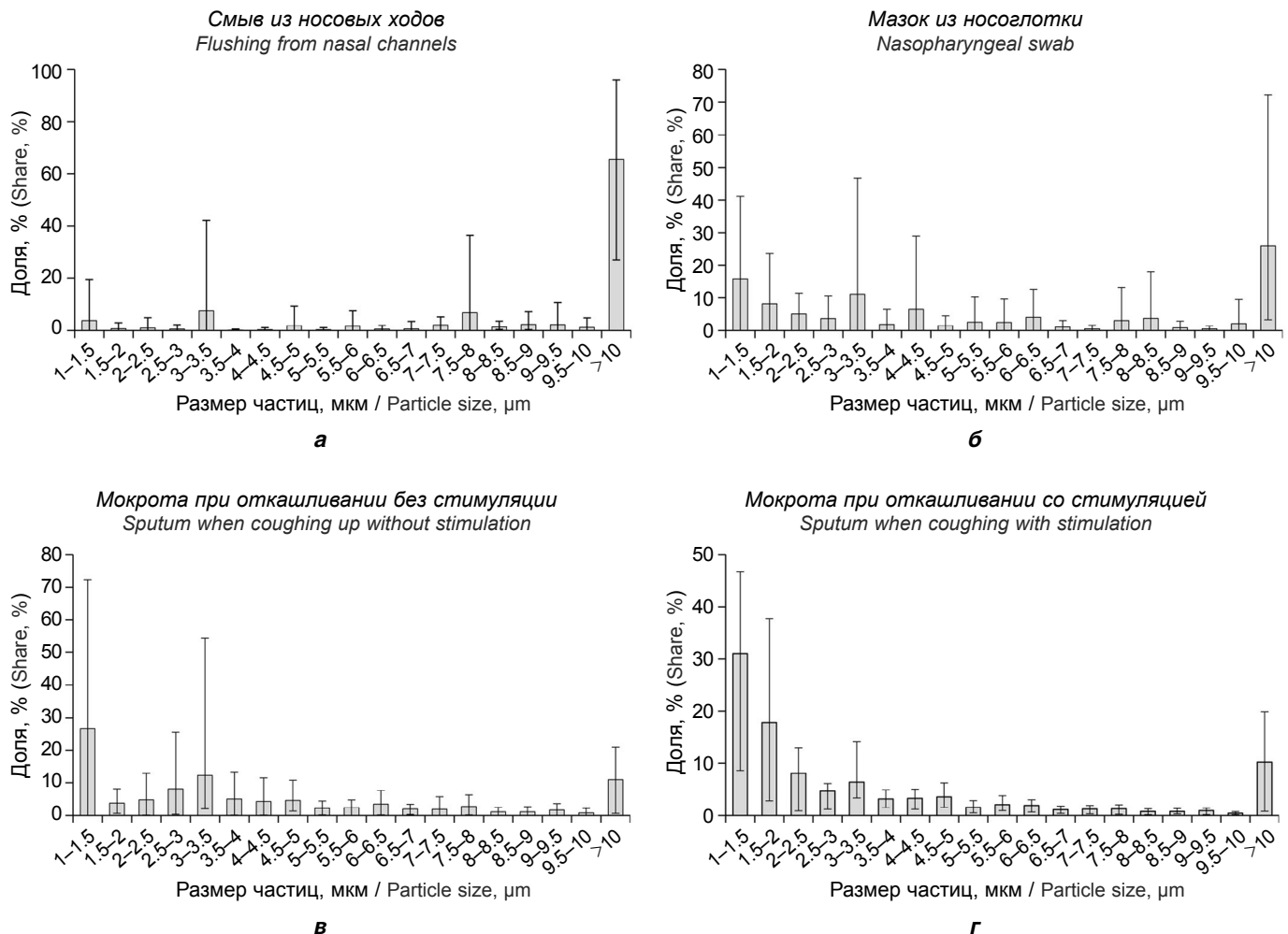


Рис. 3. Структура дисперсного состава частиц, осевших в различных участках дыхательного тракта.

Fig. 3. Disperse structure of particles, deposited in various sections of the human airways.

показал, что в крови обследуемых всех трёх зон содержались преимущественно частицы менее 2,5 мкм (от 79,3 до 99,7%), при этом частицы менее 1,5 мкм составляли 42,3–90,5%. Значимых отличий в структуре содержания твёрдых частиц в биосубстратах крови в холодный и тёплый периоды года не установлено.

Анализ морфологического состава взвешенных частиц показал, что в атмосферном воздухе во всех трёх точках исследования преобладали частицы со сферичностью 0,6–1 (52,7–100%), при этом в холодное время доля более округлых частиц была выше (58,9–100%) по сравнению с тёплым временем года (52,7–79,2%). Характерно, что в зимнее время в зоне относительного санитарно-эпидемиологического благополучия по качеству атмосферного воздуха доля частиц со сферичностью 0,6–1 регистрировалась достоверно выше в 1,6–1,7 раза ($p < 0,05$), чем на территориях с повышенным пылевым загрязнением (в зонах 1 и 2). Для тёплого времени года достоверных отличий не установлено.

В зонах с повышенным пылевым загрязнением (зоны 1 и 2) доля частиц со сферичностью 0,6–1 по мере продвижения вдыхаемого воздуха по дыхательным путям неравномерно увеличивается до 90,4–94,1%, что подтверждает гипотезу о более глубоком проникновении в дыхательные пути твёрдых частиц более округлой формы. В зоне относительного санитарно-эпидемиологического благополучия доля частиц со сферичностью 0,6–1 во вдыхаемом воздухе на всех участ-

ках дыхательных путей в холодный период оставалась на высоком уровне (83,7–100%), в тёплый период неравномерно росла до 64,3–84,8%.

В биосубстратах крови обследуемых из всех трёх зон эксперимента регистрировалась максимальная доля частиц с коэффициентом сферичности 0,6–1 (99–100%), при этом содержание частиц максимально округлой формы (сферичность 0,9–1) составило 64,3–88,1%.

Обсуждение

Полученные в настоящем исследовании результаты изменения структуры дисперсного состава пылевых частиц в различных участках дыхательного тракта качественно согласуются как с результатами, полученными ранее другими исследователями, так и с результатами моделирования, выполненного на предыдущем этапе [11, 12]. Вместе с тем отмечаются количественные расхождения оценок доли осевших частиц разного дисперсного состава в результатах релевантных исследований. В [15] показано, что частицы размером более 10 мкм оседают в верхних воздухоносных путях более чем на 75%, а в [16] эта доля достигает 97%. Численное моделирование течения воздуха, содержащего частицы пыли [11], показало, что доля осевших в носовой полости частиц размером более 10 мкм достигает 99%, а частицы диаметром менее 2,5 мкм практически не оседают в этой части воздухоносных путей.

Вероятными причинами такого расхождения результатов являются, с одной стороны, различия в условиях проведения исследований, приборного и методического оснащения эксперимента, с другой – ограниченный набор статистического материала, позволяющего получать неоспоримые количественные оценки установленных закономерностей.

Результаты настоящего исследования свидетельствуют о неравномерном характере оседания пылевых частиц в воздухоносных путях человека. Мелкие фракции проникают на максимальную глубину дыхательной системы, и соответственно область их наибольшего оседания может находиться в лёгочных альвеолах. Присутствие в выдыхаемом воздухе частиц крупного размера может объясняться коагуляцией мелких фракций за счёт физиологических процессов, что необходимо учитывать при дальнейшем развитии математической модели дыхательной системы и численном моделировании движения пылегазовой смеси в дыхательных путях человека в качестве дополнительного сценария, учитывающего коагуляцию частиц.

Компонентный состав выдыхаемого воздуха практически не сказывается на закономерностях оседания частиц в различных участках дыхательных путей, однако может существенно корректировать виды формируемых патологических состояний организма, что подтверждается результатами других релевантных исследований [17–22].

Так, например, повышенные концентрации кремния и его соединений в воздухе влияют главным образом на дыхательную систему, проявляясь в виде развития хронической обструктивной болезни лёгких (ХОБЛ), силикоза, а при длительном воздействии могут оказывать влияние на мочевыделительную (почки) и иммунную системы [18, 19]. Пыль, содержащая различные соединения металлов (кремния, мышьяка, ванадия) в концентрациях, превышающих референтные уровни, уменьшает вентиляцию и объём лёгких, повреждает слизистые оболочки глаз, верхних дыхательных путей, вызывает раздражение кожи, повышает смертность от рака лёгких и кишечника [17]. Алюминийсодержащая пыль оказывает нейротоксический эффект, вызывает респираторные нарушения в виде одышки, диспноэ, пневмокозиоза, интерстициальной пневмонии, со стороны сердечно-сосудистой системы провоцирует дилатацию и гипертрофию правых отделов сердца [20–22]. Компонентный состав пыли является важной информационной базой при разработке мероприятий медико-профилактической направленности в зонах санитарно-эпидемиологического неблагополучия по пылевому фактору.

В исследованиях [23–25] показано, что скорость оседания шарообразных твёрдых частиц значительно выше, чем частиц с неровными краями и сферичностью до 0,6. Данный факт объясняется их пластинчатой и неправильной формой, что приводит к гораздо большему аэродинамическому сопротивлению и сцеплению со слизистой оболочкой дыхательных путей. Твёрдые частицы с коэффициентом сферичности выше 0,6 (более округлые), как правило, не задерживаются и проникают в более глубокие отделы дыхательной системы, что подтверждается результатами настоящего исследования. При этом логично предположить, что мелкие и более круглые частицы пыли в отличие от крупных и неровных частиц способны проникать через мембраны клеток альвеол лёгких и попадать в общий кровоток.

Заключение

В ходе исследования определен дисперсный, компонентный и морфологический состав частиц, присутствующих в атмосферном воздухе крупных промышленных центров, и проанализированы закономерности распределения пылевых частиц в различных участках дыхательных путей человека при естественном дыхании. Установлено, что мел-

кие частицы ($PM_{2,5}$ и менее) способны проникать в нижние воздухоносные пути и лёгкие человека, при этом степень оседания на различных участках дыхательного тракта неравномерна. Так, более 65% всех осевших частиц, обнаруженных в верхних воздухоносных путях, имеют диаметр более 10 мкм. По мере продвижения вдыхаемого воздуха по дыхательным путям дисперсный состав пыли изменяется: уменьшается доля крупных частиц и соответственно увеличивается доля более мелких частиц. В мокроте нижних дыхательных путей доля частиц $PM_{2,5}$ составила более 60%, из них $PM_{1,5}$ и менее – до 46,7%.

В исследованных мазках крови установлено преимущественное содержание частиц размером менее 1,5 мкм (90,5%), из них до 88,1% частиц имели максимально округлую форму (сферичность 0,9–1).

Условия проведения исследования позволили дифференцировать пробы по компонентному и морфологическому составу. В зоне влияния крупного металлургического предприятия (точка 1) компонентный состав твёрдых частиц в холодный период года включал медь, кремний, алюминий, железо (60,1% от общего количества частиц), в тёплый период – кремний, железо, алюминий, магний (35,1%). В зоне влияния объекта теплоэнергетики (точка 2) в холодный период года основную массу частиц, содержащихся в атмосферном воздухе, составляли алюминий, кремний, железо, натрий (58,6%), в тёплый период – кремний, алюминий, калий (57,7%). Анализ полученных в ходе эксперимента данных показал, что общие закономерности оседания определяются в основном размерами и морфологией пылевых частиц и мало зависят от различий компонентного состава выдыхаемого воздуха.

Выявленный в настоящем исследовании высокий удельный вес респираторных твёрдых частиц ($PM_{1,5}$ и менее) в нижних дыхательных путях и крови требует рассмотрения вопроса о гигиеническом нормировании содержания мелкодисперсных взвешенных частиц в атмосферном воздухе населённых мест.

Следует отметить, что неоднородный компонентный и дисперсный состав твёрдых частиц в атмосферном воздухе в зависимости от зоны исследования, периода года и длительности экспозиции может формировать различные виды ответов (нарушений) со стороны здоровья, что следует учитывать при установлении приоритетных факторов риска для здоровья химической природы, разработке мероприятий медико-профилактического характера, оптимизации программ мониторинга качества атмосферного воздуха и введении соответствующих воздухоохраных мер.

В перспективе развитие темы исследования может заключаться в моделировании процессов накопления функциональных нарушений дыхательной системы и связанных с ней нарушений других органов и систем, прогнозировании на основе эволюционных математических моделей развития патологических состояний. Полученные результаты планируется использовать в качестве входных данных, а также для процедур идентификации и верификации математических моделей, при численном исследовании течения воздуха, содержащего пылевые частицы, в воздухоносных путях человека. Кроме того, результаты исследования подтвердили, что при моделировании движения пылегазовой взвеси в дыхательных путях необходимо предусмотреть сценарии, учитывающие коагуляцию частиц в процессе оседания на стенках дыхательных путей.

Поскольку описание экспериментальных исследований в представленной постановке в доступной научной литературе отсутствует, настоящие материалы могут служить основой для верификации теоретических моделей дыхания в условиях повышенного пылевого загрязнения атмосферного воздуха и последующего анализа процессов и закономерностей формирования нарушений здоровья человека с учётом дисперсного, компонентного и морфологического состава вдыхаемых твёрдых частиц.

Литература

(п.п. 1, 4, 12, 13, 16–18 см. References)

2. Лещук С.И., Очиржапова Д.Ц. Антропогенное загрязнение атмосферного воздуха и его влияние на здоровье населения. *Вестник ИрГСХА*. 2012; (51): 52–61. <https://elibrary.ru/oyzodt>
3. Ракитский В.Н., Авалиани С.Л., Новиков С.М., Шашина Т.А., Додина Н.С., Кислицин В.А. Анализ риска здоровью при воздействии атмосферных загрязнений как составная часть стратегии уменьшения глобальной эпидемии неинфекционных заболеваний. *Анализ риска здоровью*. 2019; (4): 30–6. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2019.4.03> <https://elibrary.ru/filvrk>
5. Власова Е.М., Устинова О.Ю., Носов А.Е., Загороднов С.Ю. Особенности заболеваний органов дыхания у плавильщиков титановых сплавов в условиях сочетанного воздействия мелкодисперсной пыли и соединений хлора. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(2): 153–8. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-2-153-158> <https://elibrary.ru/yznasd>
6. Тихонова И.В., Землянова М.А., Кольдибекова Ю.В., Пескова Е.В., Игнатова А.М. Гигиеническая оценка аэрогенного воздействия взвешенных веществ на заболеваемость детей болезнями органов дыхания в зоне влияния выбросов металлургического производства. *Анализ риска здоровью*. 2020; (3): 61–9. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.07> <https://elibrary.ru/anuqda>
7. Кацнельсон Б.А., Алексеева О.Г., Привалова Л.И., Ползик Е.В. *Пневмококоз: патогенез и биологическая профилактика*. Екатеринбург; 1995.
8. Трусов П.В., Зайцева Н.В., Кирьянов Д.А., Камалтдинов М.Р., Цинкер М.Ю., Чигвинцев В.М. и др. Математическая модель эволюции функциональных нарушений в организме человека с учетом внешнесредовых факторов. *Математическая биология и биоинформатика*. 2012; 7(2): 589–610. <https://elibrary.ru/pnbukz>
9. Трусов П.В., Зайцева Н.В., Цинкер М.Ю., Некрасова А.В. Математическая модель течения воздуха с твердыми частицами в носовой полости человека. *Математическая биология и биоинформатика*. 2021; 16(2): 349–66. <https://doi.org/10.17537/2021.16.349>
10. Трусов П.В., Зайцева Н.В., Цинкер М.Ю., Бабушкина А.В. Моделирование течения запыленного воздуха в респираторном тракте. *Российский журнал биомеханики*. 2018; 22(3): 301–14. <https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2018.3.03> <https://elibrary.ru/dmwdgw>
11. Трусов П.В., Зайцева Н.В., Цинкер М.Ю. О моделировании течения воздуха в легких человека: конститутивные соотношения для описания деформирования пористой среды. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2020; (4): 165–74. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.4.14> <https://elibrary.ru/omarpf>
14. Мудрый И.В., Короленко Т.К. Тяжелые металлы в окружающей среде и их влияние на организм. *Врачебное дело*. 2002; 5(6): 6–9.
15. Таран А.А., Бирюкова Н.В. Влияние экологии на здоровье человека в XXI веке. В кн.: *Актуальные вопросы современной науки и образования*. Пенза; 2021: 258–64.
19. Данилов И.П., Захаренков В.В., Олещенко А.М., Шавлова О.П., Суржихов Д.В., Корсакова Т.Г. и др. Профессиональная заболеваемость работников алюминиевой промышленности – возможные пути решения проблемы. *Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук*. 2010; (4): 17–20. <https://elibrary.ru/ogutmx>
20. Гаврилова Н.Н., Назаров В.В., Яровая О.В. *Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов*. М.; 2012.
21. Кашуба Н.А. О новых подходах к оценке влияния пыли на органы дыхания. *Гигиена и санитария*. 2018; 97(3): 264–8. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2018-97-3-264-268> <https://elibrary.ru/xqkqst>
22. Аверкова О.А., Крюков И.В., Уваров В.А., Минко В.А., Крюкова О.С. Исследование физико-механических свойств пыли, образующейся в маникюрных кабинетах. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2019; (2): 69–80. https://doi.org/10.12737/article_5c73fc18596104.60696082 <https://elibrary.ru/yxmxpf>

References

1. Brunekreef B., Holgate S.T. Air pollution and health. *Lancet*. 2002; 360(9341): 1233–42. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(02\)11274-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(02)11274-8)
2. Leshchuk S.I., Ochirzhapova D.Ts. Anthropogenic contamination of atmosphere air and its influence on population's health. *Vestnik IrGSKhA*. 2012; (51): 52–61. <https://elibrary.ru/oyzodt> (in Russian)
3. Rakitskiy V.N., Avaliani S.L., Novikov S.M., Shashina T.A., Dodina N.S., Kislicin V.A. Health risk analysis related to exposure to ambient air contamination as a component in the strategy aimed at reducing global non-infectious epidemics. *Analiz riska zdorov'yu*. 2019; (4): 30–6. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2019.4.03> <https://elibrary.ru/filvrk> (in Russian)
4. Xing Y.F., Xu Y.H., Shi M.H., Lian Y.X. The impact of PM2.5 on the human respiratory system. *J. Thorac. Dis.* 2016; 8(1): E69–74. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2016.01.19>
5. Vlasova E.M., Ustinova O.Yu., Nosov A.E., Zagorodnov S.Yu. Peculiarities of respiratory organs diseases in smelters dealing with titanium alloys under combined exposure to fine-disperse dust and chlorine compounds. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian Journal)*. 2019; 98(2): 153–8. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-2-153-158> <https://elibrary.ru/yznasd> (in Russian)
6. Tikhonova I.V., Zemlyanova M.A., Koldibekova Yu.V., Peskova E.V., Ignatova A.M. Hygienic assessment of aerogenic exposure to particulate matter and its impacts on morbidity with respiratory diseases among children living in a zone influenced by emissions from metallurgic production. *Analiz riska zdorov'yu*. 2020; (3): 61–9. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.07> <https://elibrary.ru/anuqda> (in Russian)
7. Katsnel'son B.A., Alekseeva O.G., Privalova L.I., Polzik E.V. *Pneumoconiosis: Pathogenesis and Biological Prevention [Pnevmoconioz: patogenez i biologicheskaya profilaktika]*. Ekaterinburg; 1995. (in Russian)
8. Trusov P.V., Zaytseva N.V., Kir'yanov D.A., Kamaltdinov M.R., Tsinker M.Yu., Chigvintsev V.M., et al. A mathematical model for evolution of human functional disorders influenced by environment factors. *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika*. 2012; 7(2): 589–610. <https://elibrary.ru/pnbukz> (in Russian)
9. Trusov P.V., Zaytseva N.V., Tsinker M.Yu., Nekrasova A.V. Mathematical model of airflow and solid particles transport in the human nasal cavity. *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika*. 2021; 16(2): 349–66. <https://doi.org/10.17537/2021.16.349> (in Russian)
10. Trusov P.V., Zaytseva N.V., Tsinker M.Yu., Babushkina A.V. Modelling dusty air flow in the human respiratory tract. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki*. 2018; 22(3): 301–14. <https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2018.3.03> <https://elibrary.ru/dmwdgw> (in Russian)
11. Trusov P.V., Zaytseva N.V., Tsinker M.Yu. On modeling of airflow in human lungs: constitutive relations to describe deformation of porous medium. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. 2020; (4): 165–74. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.4.14> <https://elibrary.ru/omarpf> (in Russian)
12. Brain J.D., Valberg P.A. Models of lung retention based on ICRP task group report. *Arch. Environ. Health*. 1974; 28(1): 1–11. <https://doi.org/10.1080/00039896.1974.10666424>
13. Saghaian S.E., Azimian A.R., Jalilvand R., Dadkhah S., Saghaian S.M. Computational analysis of airflow and particle deposition fraction in the upper part of the human respiratory system. *Biol. Eng. Med.* 2018; 3(6): 6–9. <https://doi.org/10.15761/BEM.1000155>
14. Mudryy I.V., Korolenko T.K. Heavy metals in the environment and their effect on the body. *Vrachebnoe delo*. 2002; 5(6): 6–9. (in Russian)
15. Taran A.A., Biryukova N.V. Modern quality of life in a metropolis and methods of dealing with environmental degradation. In: *Topical Issues of Modern Science and Education [Aktual'nye voprosy sovremennoy nauki i obrazovaniya]*. Penza; 2021: 258–64. (in Russian)
16. ATSDR. Toxicological profile for Silica. Atlanta, GA; 2019. Available at: <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp211.pdf>
17. DailyHealthPost. The link between aluminum exposure and Alzheimer's disease can no longer be ignored; 2020. Available at: <https://dailyhealthpost.com/study-links-alzheimers-to-aluminum-exposure/>
18. ATSDR. Toxicological profile for Aluminum. Atlanta, GA; 2008. Available at: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp22.pdf>
19. Danilov I.P., Zakharenkov V.V., Oleshchenko A.M., Shavlova O.P., Surzhikov D.V., Korsakova T.G., et al. Occupational diseases in aluminium workers – possible ways of solving the problem. *Bulleten' Vostochno-Sibirskogo nauchnogo tsentra Sibirskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii meditsinskikh nauk*. 2010; (4): 17–20. <https://elibrary.ru/ogutmx> (in Russian)
20. Gavrilova N.N., Nazarov V.V., Yarovaya O.V. *Microscopic Methods for Determining the Particle Size of Dispersed Materials [Mikroskopicheskie metody opredeleniya razmerov chastiц dispersnykh materialov]*. Moscow; 2012. (in Russian)
21. Kashuba N.A. About new approaches in the estimation of the impact of dust on the respiratory system. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian Journal)*. 2018; 97(3): 264–8. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2018-97-3-264-268> <https://elibrary.ru/xqkqst> (in Russian)
22. Averkova O.A., Kryukov I.V., Uvarov V.A., Minko V.A., Kryukova O.S. The study physical and mechanical properties of dust formed in manicure cabinets. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2019; (2): 69–80. https://doi.org/10.12737/article_5c73fc18596104.60696082 <https://elibrary.ru/yxmxpf> (in Russian)