



Сравнительная гигиеническая оценка состава золы и пылевых фракций атмосферного воздуха в зоне влияния теплоэлектростанции для повышения точности оценки риска здоровью населения

Н.В. Зайцева, С.В. Клейн, А.М. Андришунас, С.Ю. Балашов

ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», ул. Монастырская, д. 82., г. Пермь, 614045, Российская Федерация

Резюме

Введение. Актуальность исследования определена функционированием значимого количества теплоэлектростанций, работающих на твердом топливе (40 %) и являющихся источником загрязнения атмосферы и риска здоровью населения.

Цель исследования: сопоставительная гигиеническая оценка компонентного, дисперсного и морфологического состава золы и пылевых частиц атмосферного воздуха в зоне влияния объекта теплоэнергетики, работающего на твердом топливе (уголь), для задач повышения точности оценки риска здоровью населения.

Материалы и методы. Используются унифицированные и утвержденные методы гигиенической оценки качества воздуха, идентификации опасности, оценки риска здоровью; электронной микроскопии и микрозондового рентгено-спектрального анализа компонентного, дисперсного, морфологического состава золы, атмосферного воздуха.

Результаты. Крупная теплоэлектростанция, работающая на угле, выбрасывает порядка 36 веществ. Большую часть частиц золы бурого угля составляют соединения кальция, магния, железа, кремния, алюминия, натрия, калия, серы, фосфора – более 59 % от общего содержания. Твердые частицы, содержащиеся в золе и воздухе исследуемой зоны, схожи по компонентному и дисперсному составу, представляют собой преимущественно частицы менее 10 мкм с коэффициентом сферичности 0,4–1,0. В исследуемой зоне формируются превышения гигиенических нормативов по семи примесям: до 3,3 ПДК_{мр}, до 1,4 ПДК_{сс}, до 1,5 ПДК_{сг} (вклад теплоэлектростанции до 40 %); повышенные уровни неканцерогенного риска здоровью, в частности только от пылевых фракций – до 5,5 HQ_{ac}, до 2,4 HQ_{ch}, до 6,9 Hlch, классифицируемые как «высокие» и «настораживающие».

Выводы. Идентифицированные твердые частицы (алюминий, магний, кальций и др.) являются более значимыми факторами риска по сравнению с неидентифицированными взвешенными веществами и могут формировать нарушения органов дыхания, кровообращения, зрения и др., что требует их количественной оценки. Данные примеси не учтены в инвентаризационных ведомостях выбросов и не контролируются на постах мониторинга качества воздуха. В результате риски здоровью, формируемые деятельностью теплоэлектростанции, могут быть недооценены.

Ключевые слова: теплоэлектростанции, загрязнение воздуха, пылевые фракции, зола твердого топлива, риск здоровью населения, зона влияния ТЭС.

Для цитирования: Зайцева Н.В., Клейн С.В., Андришунас А.М., Балашов С.Ю. Сравнительная гигиеническая оценка состава золы и пылевых фракций атмосферного воздуха в зоне влияния теплоэлектростанции для повышения точности оценки риска здоровью населения // Здоровье населения и среда обитания. 2023. Т. 31. № 12. С. 37–45. doi: 10.35627/2219-5238/2023-31-12-37-45

Comparative Hygienic Assessment of the Composition of Ash and Dust Fractions in Ambient Air of the Area Affected by Emissions from a Thermal Power Station: Improving the Accuracy of Human Health Risk Assessment

Nina V. Zaitseva, Svetlana V. Kleyn, Alena M. Andrishunas, Stanislav Yu. Balashov

Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies,
82 Monastyrskaya Street, Perm, 614045, Russian Federation

Summary

Introduction: The relevance of the study is determined by a great number of functioning thermal power stations that operate using solid fuels (40 %) and are a source of ambient air pollution posing human health risks.

Objective: A comparative hygienic assessment of the component, disperse, and morphological composition of fly ash and airborne particles in the area surrounding a coal-fired power station for the purpose of increasing the accuracy of human health risk assessment.

Materials and methods: We have used unified and approved methods for hygienic assessment of ambient air quality; hazard identification and health risk assessment; scanning electron microscopy and micro-X-ray fluorescence spectroscopy of component, disperse, and morphological structure of fly ash and airborne particulate matter.

Results and discussion: Large coal-fired thermal power plants emit about 36 chemicals. Over 59 % of brown coal ash particles are calcium, magnesium, iron, silicon, aluminum, sodium, potassium, sulfur, and phosphorus compounds. Particles found in fly ash and ambient air of the surrounding area have similar components and dispersion, are predominantly less than 10 µm in diameter with the sphericity index ranging from 0.4 to 1.0. Maximum allowable concentrations (MAC) of seven chemicals are exceeded in the study area: up to 3.3 single MAC, up to 1.4 average daily MAC, and up to 1.5 average annual MAC, with the estimated contribution of the thermal power stations of about 40 %. We have also established increased non-carcinogenic health risks with the dust fractions alone generating risk levels as high as 5.5 HQ_{ac}, 2.4 HQ_{ch}, and 6.9 Hlch, which are rated as “high” and “alerting”.

Conclusion: Identified solid particles (aluminum, magnesium, calcium, etc.) are more significant risk factors compared to unidentified particulate matter and can cause respiratory and circulatory diseases, diseases of the eye, etc., which requires their quantification. These chemicals are not included in air emissions inventory lists and are, therefore, not monitored. As a result, health risks posed by economic activities of thermal power stations may be underestimated.

Keywords: thermal power stations, air pollution, dust fractions, fly ash, health risk, affected zone.

For citation: Zaitseva NV, Kleyn SV, Andrishunas AM, Balashov SYu. Comparative hygienic assessment of the composition of ash and dust fractions in ambient air of the area affected by emissions from a thermal power station: Improving the accuracy of human health risk assessment. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2023;31(12):37–45 (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2023-31-12-37-45

Введение. Основными стратегическими направлениями государственной политики РФ в сфере энергетики являются обеспечение надежной и доступной электроэнергией всех граждан страны, развитие и использование экологически чистых и эффективных источников энергии и обеспечение социально-экономического развития государства. Однако в свете увеличения потребления энергии загрязнение среды обитания становится серьезной гигиенической и экологической проблемой: энергетические источники наносят значительный ущерб окружающей среде, а также представляют угрозу для здоровья человека и всех живых организмов [1, 2].

Теплоэнергетика как одна из основных составляющих энергетической отрасли включает в себя производство и транспортировку тепловой энергии. Научные исследования в данной области демонстрируют, что деятельность теплоэнергетических предприятий может оказывать отрицательное влияние на здоровье населения и окружающую среду по сравнению с другими отраслями промышленности и в значительной степени зависит от вида используемого топлива [1, 3–5]. Основными источниками энергии являются ископаемое топливо (уголь, горючие сланцы, нефть и природный газ), а также ядерный и термоядерный синтез, альтернативные источники энергии (солнечная, ветровая и гидроэнергия). Разнообразие и доступность различных видов топлива позволяет России полностью покрывать свои энергетические потребности и экспортировать топливные ресурсы в другие страны. В настоящее время примерно 40 % производимой электроэнергии в России генерируется на тепловых электростанциях. Доля угля в электробалансе страны составляет более 13 % [2, 6].

По данным официальной статистики^{1,2}, объекты топливно-энергетического комплекса являются источниками выбросов различных химических примесей. Основными из них являются сажа, углерода оксид, взвешенные твердые частицы (PM_{10} и $PM_{2,5}$), диоксид серы, оксиды азота, неорганическая пыль, бенз(а)пирен, метан, фториды, сероводород, предельные и непредельные углеводороды. Кроме того, выбросы от объектов теплоэнергетики могут содержать различные соединения металлов: алюминия, ванадия, кальция, железа, магния, никеля, марганца и другие [7–9].

В суммарном объеме выбросов от объектов теплоэнергетики в зависимости от технологии сжигания топлива твердые частицы (взвешенные вещества, пыль, сажа) могут составлять от 15 до 70 %. Взвешенные частицы, которые обычно используют для характеристики пылевой смеси и которые доказанно способны оказывать негативное влияние на здоровье населения, могут содержать от 10 до 90 % фракций микроразмерного диапазона (PM_{10} , $PM_{2,5}$). Взвешенные частицы $PM_{2,5}$ представляют собой наиболее опасную категорию пылевых частиц – они имеют способность проникать в дыхательную

систему, мигрировать в более глубокие отделы легких и попадать в кровоток, вызывая различные системные нарушения [10–12].

По данным релевантной научной литературы, повышенные концентрации мелкодисперсных пылей в атмосферном воздухе оказывают влияние на повышение заболеваемости, смертности, сокращение продолжительности жизни. Так, в промышленных районах с высокой степенью атмосферного загрязнения заболеваемость населения на 15 % превышает аналогичный показатель зон, где качество атмосферного воздуха соответствует нормативным требованиям [4–7, 13]. В крупных промышленных центрах инцидентность респираторных и дерматологических заболеваний, а также аллергических состояний у детей встречается в 2 раза чаще и в 2,5 раза длится дольше по сравнению с районами, где качество атмосферного воздуха соответствует санитарно-гигиеническим критериям [13, 14].

Цель исследования – сопоставительная гигиеническая оценка компонентного, дисперсного и морфологического состава золы и пылевых частиц атмосферного воздуха в зоне влияния объекта теплоэнергетики, работающей на твердом топливе (уголь), для задач повышения точности оценки риска здоровью населения.

Материалы и методы. Исследование выполнено в 2022–2023 гг. На территории исследования основным топливом, используемым на крупной теплоэлектростанции (ТЭС), является твердое топливо – бурый уголь Канско-Ачинского угольного месторождения, неорганическая часть которого состоит из силикатов, сульфидов, сульфатов, карбонатов, оксидов железа, кремния (45–60 %), алюминия (10–30 %), магния, кальция [15–16]. Для исследования отбиралась зола, оставшаяся в результате технологического процесса сжигания угля, летучая часть которой выбрасывается с газообразными примесями в атмосферный воздух.

Для установления дисперсного и морфологического состава частиц золы использовали метод электронной микроскопии (микроскоп марки JSM-63090LV). Порошковая проба наносилась на углеродную подложку. Химический состав золы определялся методом микрозондового рентгеноспектрального анализа. Для анализа изображений с получением количественных характеристик дисперсности и морфологии частиц использовалась программа Image J – Fiji (модуль “Analyze Particles”).

В рамках данного исследования проводилась сравнительная оценка компонентного, дисперсного и морфологического состава пылевых частиц, выбрасываемых исследуемой ТЭС в виде золы, с твердыми примесями, содержащимися в атмосферном воздухе в зоне максимальных концентраций, формируемых выбросами данной ТЭС.

Исследование состава атмосферных пылевых частиц выполнялось с использованием электронной микроскопии. Определение концентраций взвешенных веществ в атмосферном воздухе

¹ О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2022 году: Государственный доклад. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2023. 368 с.

² О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2021 году: Государственный доклад. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2022. 340 с.

осуществлялось согласно требованиям стандарта РД 52.04.893–2020³ с использованием гравиметрического метода. Содержание частиц микроразмерного диапазона $PM_{2.5}$ и PM_{10} – с использованием прибора DUSTTRAK 8533 согласно требованиям стандарта ГОСТ 17.2.3.01–86⁴.

Для установления уровня формируемой пылевой экспозиции и вклада исследуемой ТЭС в загрязнение атмосферного воздуха территории проведена серия расчетов рассеивания загрязняющих веществ с применением стандартных процедур⁵. Исходной информацией являлась электронная база источников выбросов загрязняющих веществ от исследуемой ТЭС и в целом по городу от стационарных и передвижных источников (2020 г.). Расчеты рассеивания проводились в точках расположения жилых домов на всей исследуемой территории. В каждой расчетной точке определялись максимальные разовые, среднесуточные и среднегодовые концентрации загрязняющих веществ.

Для получения более реальной картины загрязнения атмосферы выполнялась процедура верификации⁶ расчетных концентраций данными натурных замеров атмосферного воздуха (за 2019–2021 гг. по 18 веществам) со стационарных постов наблюдения на территории города. Гигиеническая оценка концентраций атмосферного воздуха проводилась на соответствие требованиям СанПиН 1.2.3685–21⁷.

Зоны с установленной экспозицией пересекались с векторным слоем данных о плотности населения территории.

Проведен сравнительный анализ данных инвентаризации с результатами натурных исследований атмосферного воздуха на ближайшем посту мониторинга и результатами идентификации пылевых частиц золы и проб атмосферного воздуха в исследуемой зоне.

Оценка риска здоровью населения в исследуемой зоне жилой застройки и идентификация опасности расшифрованных пылевых частиц проводилась в соответствии с Р 2.1.10.1920–04⁸, классификация уровней риска осуществлялась в соответствии с МР 2.1.6.0157–19⁹.

Результаты. В соответствии с ведомостью инвентаризации источников выбросов исследуемая ТЭС, работающая на угле, со вспомогательными объектами, которые являются неотъемлемой частью технологического процесса, выбрасывает в атмосферный воздух 36 загрязняющих веществ, в т. ч. 11 твердых: окись железа, соединения марганца, оксид никеля, хром, сажа, плохо растворимые фториды, бенз(а)пирен, взвешенные вещества, абразивная пыль, неорганическая пыль, содержащая до 20 % SiO_2 , 70–20 % SiO_2 . Доля твердых фракций в выбросах составляет 30,5 %.

Анализ элементного состава золы, образующейся в результате сжигания угля на ТЭС и выбрасываемой в атмосферу, показал присутствие десяти компонентов: железо, кремний, кальций, натрий, алюминий, магний, калий, сера, фосфор и кислород. Фотоизображения твердых частиц золы, полученные в результате микроскопического исследования, представлены на рис. 1.

Путем проведения рентгеноспектрального анализа установлено, что преобладающую долю частиц, содержащихся в золе, составляют: кальций, магний, железо, кремний, алюминий, натрий, калий, сера и фосфор (суммарно более 59 %) (см. рис. 2). Необходимо подчеркнуть, что кальций, магний, алюминий, натрий, калий и фосфор не учтены в инвентаризации выбросов загрязняющих веществ соответствующей ТЭС.

Анализ гранулометрического состава твердых частиц золы выявил, что более 60 % частиц имеют

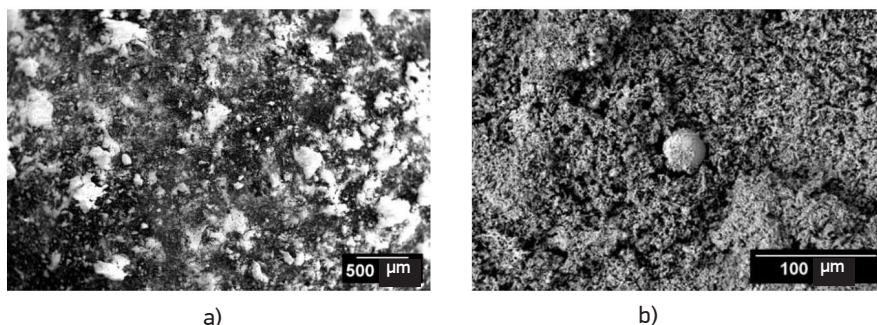


Рис. 1. Микроснимки твердых пылевых частиц в золе с различным увеличением: а) в 30 раз, б) в 350 раз

Fig. 1. Micrographs of solid particles in fly ash at different magnifications: а) $\times 30$, б) $\times 350$

³ РД 52.04.893–2020 Массовая концентрация взвешенных веществ в пробах атмосферного воздуха, 2020. 24 с.

⁴ ГОСТ 17.2.3.01–86 Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов, 2005. 4 с.

⁵ Расчеты проводились с использованием УПРЗА «Эколог» (версия 4), реализующей Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе (утв. приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273) и модуля «Средние». Метеохарактеристики получены от ГГО им. Воейкова в формате метеофайла по запросу.

⁶ МР 2.1.6.0157–19 Формирование программ наблюдения за качеством атмосферного воздуха и количественная оценка экспозиции населения для задач социально-гигиенического мониторинга. М., 2019. 36 с.

⁷ СанПиН 1.2.3685–21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М., 2021. 469 с.

⁸ Р 2.1.10.1920–04 Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 143 с.

⁹ МР 2.1.6.0157–19 Формирование программ наблюдения за качеством атмосферного воздуха и количественная оценка экспозиции населения для задач социальногигиенического мониторинга. М., 2019. 36 с.

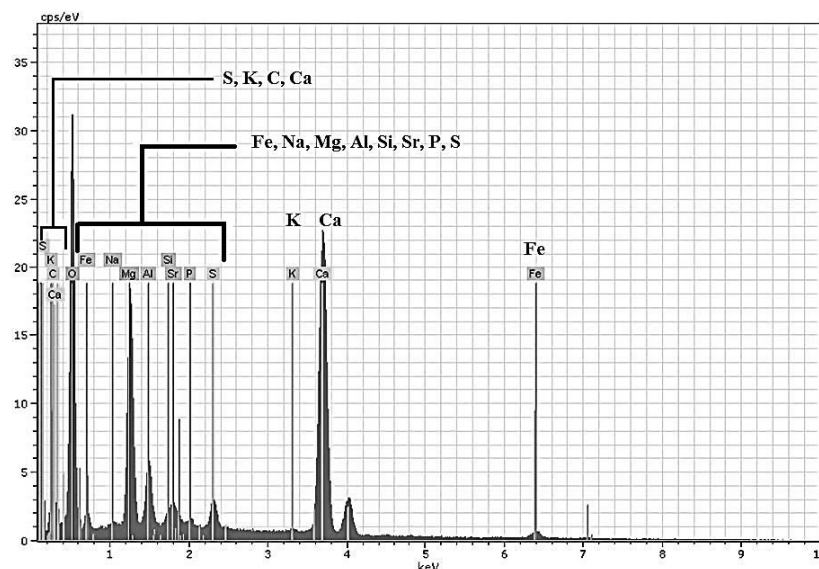


Рис. 2. Спектрограмма компонентного состава золы
Fig. 2. Spectrogram of elemental composition of coal fly ash

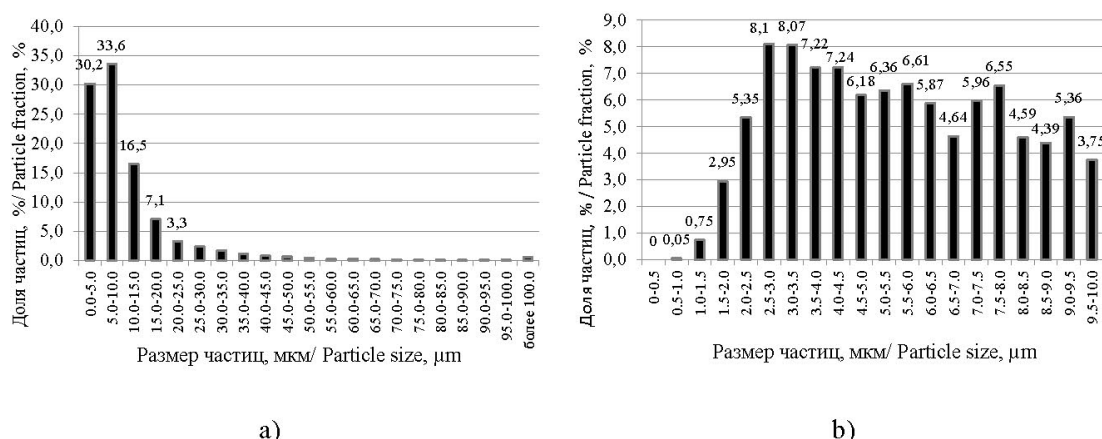


Рис. 3. Дисперсный состав золы с размером частиц до 100 (а) и до 10 мкм (b)
Fig. 3. Disperse composition of fly ash with the particle size up to 100 (a) and up to 10 μm (b)

размер до 10 мкм (см. рис. 3а) и содержат железо, магний, кальций и кремний и пр. Суммарно наибольшую долю (до 52,2 %) содержания твердых частиц в золе составили частицы размером до 5,5 мкм (см. рис. 3б).

Анализ морфологического состава твердых частиц золы размером до 10 мкм показал, что 57 % частиц обладают сферичностью 0,4–0,7. Частицы преимущественно округлой формы (коэффициент сферичности 0,7–1,0), способные проникать в более глубокие отделы дыхательной системы, составляют около 32 % (см. табл. 1).

Сравнительный анализ морфологического состава золы и проб атмосферного воздуха в зоне наибольшего (по долевого вклада – до 40 %) влияния выбросов исследуемой ТЭС показал, что частицы аналогичного размера (до 10 мкм) в атмосферном воздухе составляют более 41 %. Порядка 50 % частиц в атмосферном воздухе имеют также более округлую форму (сферичность 0,7–1,0) (см. табл. 1).

Компонентный состав твердых частиц атмосферного воздуха и золы также сопоставим. Основная

Таблица 1. Морфологический состав (коэффициент сферичности) частиц золы и частиц, содержащихся в пробах атмосферного воздуха, до 10 мкм, %

Table 1. Morphological composition (sphericity index) of fly ash and particulate matter found in ambient air samples, < 10 μm , %

Коэффициент сферичности частиц / Particle sphericity index	Содержание частиц в золе, % / Particle content in ash, %	Содержание частиц в атмосферном воздухе, % / Particle content in ambient air, %
0–0,1	0,00	0,00
0,1–0,2	0,02	0,33
0,2–0,3	1,79	7,60
0,3–0,4	8,25	8,92
0,4–0,5	16,59	10,57
0,5–0,6	20,04	10,79
0,6–0,7	20,36	10,90
0,7–0,8	16,56	9,58
0,8–0,9	11,07	10,90
0,9–1,0	5,33	30,40

доля твердых частиц атмосферного воздуха состоит из алюминия, кремния, калия, железа, натрия, кальция, серы и фосфора – суммарно более 90 % (см. рис. 4). Дисперсный состав взвешенных частиц в атмосферном воздухе в зоне максимальных концентраций, формируемых выбросами исследуемой ТЭС, по сравнению с составом золы по доле содержания частиц микроразмерного диапазона отличался незначительно. Частицы в атмосферном воздухе имеют различную величину, при этом в исследуемых образцах преобладают частицы, не превышающие в размере 4,0 мкм и суммарно составляющие 65 %. Среди них частицы размером менее 1,5 мкм составляют 20,9 %. (см. рис. 3, 5).

Гигиенический анализ результатов расчетов рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере выявил, что в зоне максимальных концентраций, формируемых выбросами анализируемой ТЭС, регистрируются превышения гигиенических нормативов (ПДК_{мр}) по 4 компонентам твердых фракций: углерод, взвешенные вещества и неорганическая пыль с содержанием SiO₂ от 70 до 20 %, и до 20 % (до 1,1–5,1 раза).

На ближайшем посту мониторинга качества атмосферного воздуха, расположенном на расстоянии 3,8 км от зоны исследования, инструментальный мониторинг проводится только для 14 из 36 примесей, выбрасываемых ТЭС, из них твердого агрегатного состояния 6: бенз(а)пирен, углерод, неорганические плохо растворимые фториды, взвешенные вещества, в т. ч. взвешенные частицы PM₁₀, взвешенные частицы PM_{2,5}.

Расчетные данные, уточненные исследованиями на постах мониторинга, показали, что в исследуемой зоне превышены гигиенические нормативы по пяти веществам твердого агрегатного состояния:

- ПДК_{мр}: взвешенные вещества, пыль неорганическая SiO₂ 20–70 % (до 1,5–3,3 ПДК_{мр});
- ПДК_{сг}: взвешенные вещества, марганец и его соединения, хром, фториды неорганические плохо растворимые (до 1,2–1,5 ПДК_{сг}).

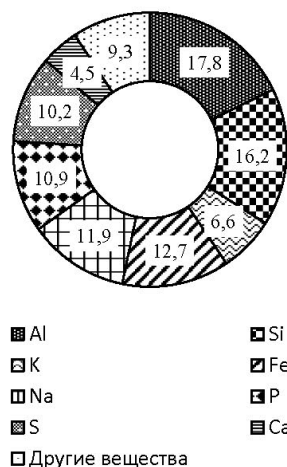


Рис. 4. Компонентный состав взвешенных частиц в атмосферном воздухе в зоне максимальных концентраций, формируемых выбросами ТЭС, %

Fig. 4. Chemical composition of suspended particles sampled in the zone of maximum concentrations formed by emissions from the thermal power station, %

При отборе проб в исследуемой зоне зарегистрированы превышения гигиенических нормативов по взвешенным веществам, взвешенным частицам PM_{2,5} и PM₁₀ (до 1,2–1,4 ПДК_{сг}).

Оценка риска здоровью населения в исследуемой зоне показала, что установленные уровни экспозиции при остром ингаляционном неканцерогенном воздействии анализируемых твердых частиц формируют повышенные уровни коэффициентов опасности, классифицируемые как «высокие» (до 5,5 HQ_{ас} для взвешенных веществ).

Хроническое воздействие исследуемых химических примесей твердых фракций создает настораживающие и высокие уровни риска для здоровья, выраженные коэффициентами опасности, по 4 веществам: марганец (до 1,2 HQ_{сг}), никель оксид (до 2,3 HQ_{сг}), плохо растворимые неорганические фториды (до 2,4 HQ_{сг}) и взвешенные вещества (до 1,5 HQ_{сг}), которые присутствуют в ведомостях инвентаризации анализируемой ТЭС. Повышенные значения индексов опасности (более 3,0 H_{сг}) формируются в отношении возникновения заболеваний дыхательной, нервной, кроветворной и костно-мышечной систем (до 6,9 H_{сг}). В условиях повышенной опасности проживает более 25 тыс. человек.

Суммарный уровень канцерогенного риска (CRT) в исследуемой зоне регистрировался на уровне $5,8 \times 10^{-5}$ (допустимый уровень).

Детальная идентификация компонентного состава проб атмосферного воздуха была дополнена процедурой идентификации опасности установленных химических примесей (см. табл. 2). Выявленные в результате электронной микроскопии примеси, такие как натрий, магний, кальций, калий и др., не учитываются в ведомостях инвентаризации ТЭС, но идентифицированы в компонентном составе золы и атмосферного воздуха в зоне максимальных концентраций твердых примесей, формируемых выбросами анализируемого хозяйствующего субъекта. Данные примеси проявляют более выраженную токсичность и широкий спектр негативных эффектов

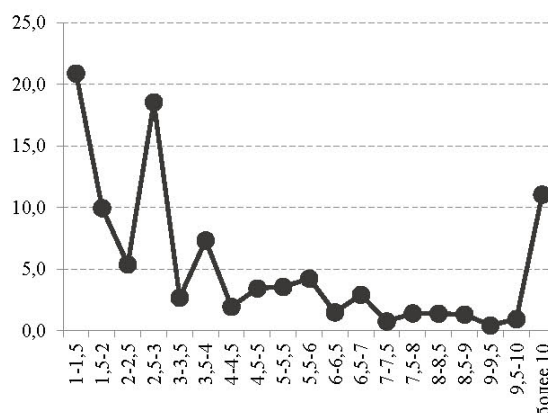


Рис. 5. Дисперсный состав взвешенных частиц (мкм) в атмосферном воздухе в зоне максимальных концентраций, формируемых выбросами ТЭС, %

Fig. 5. Disperse composition of suspended particles (μm) sampled in the zone of maximum concentrations formed by emissions from the thermal power station, %

на здоровье, чем учтенные в ведомости инвентаризации взвешенные вещества, неорганическая пыль, содержащая 70–20 % SiO_2 и до 20 % SiO_2 , что указывает на недооценку степени опасности для здоровья населения (см. табл. 2). Важно отметить, что соединения алюминия, железа, калия, кремния, кальция, натрия и магния не исследуются на ближайшем посту мониторинга.

Исследование воздействия твердых фракций выбросов ТЭС на здоровье показало, что идентифицированные вещества обладают более широким спектром неканцерогенных эффектов при ингаляционном воздействии, чем не идентифицированные по составу взвешенные вещества и неорганическая пыль, содержащая 70–20 % SiO_2 и до 20 % SiO_2 (табл. 2): при остром воздействии дополнительно формируют опасность нарушения органов зрения (соединения натрия), при хроническом – изменение массы тела (соединения алюминия), нарушения сердечно-сосудистой системы, развития (частицы PM_{10}).

Кроме этого, референтные уровни идентифицированных в атмосферном воздухе твердых химических примесей жестче, чем установленные нормативы для взвешенных веществ и пыли неорганической: 70–20 % SiO_2 в 1,5–50 раз (см. табл. 2).

Как уже было показано, более 60 % твердых частиц в атмосферном воздухе имеют размеры меньше 10 мкм, из них 36,3 % – частицы до 2,5 мкм (см. рис. 5). Спектр негативных воздействий от идентифицированных мелкодисперсных частиц шире, чем от неидентифицированных взвешенных веществ; референтные уровни более жесткие: при хроническом воздействии различаются в 1,5–5 раз, а при остром – в 2,0–4,6 раза (см. табл. 2).

Обсуждение. По результатам релевантных научных исследований [17–18] летучие золы составляют основную часть отходов, производимых в результате сжигания угля на объектах теплоэнергетики, и их доля может варьироваться от 60 до 95 %. Характеризуясь сложной поликомпонентной структурой, зола обладает разнообразным гранулометрическим и минерально-фазовым составом, что представляет определенные трудности при проведении исследований. Размеры частиц летучих зол варьируются от субмикрона до сотен микрон. В зависимости от характеристик угля и условий сжигания, доля зольных частиц размером менее 10 мкм может колебаться от 6 до 42 %, частиц размером от 10 до 90 мкм – от 40 до 92 % [17–18].

В ходе проведенных исследований [19–21] компонентного, дисперсного и морфологического состава частиц атмосферного воздуха, присутствующих в зонах воздействия объектов теплоэнергетики, обнаружено, что частицы малого размера (до 2,5 мкм) подвергаются неравномерному осаждению в различных сегментах дыхательной системы человека. Современные научные исследования подтверждают наличие связи между загрязнением воздуха частицами малого размера (до 2,5 мкм) и появлением ряда заболеваний, таких как астма, бронхит, острые и хронические респираторные расстройства, одышка, затруднение дыхания и преждевременная смерть [22–25].

Полученные в настоящем исследовании результаты анализа качества атмосферного воздуха указывают, что рассчитанные уровни экспозиции и риска для здоровья, формируемые в результате хозяйственной деятельности ТЭС, могут быть

Таблица 2. Качественные и количественные параметры неканцерогенной (острой и хронической) и канцерогенной опасности¹⁰ при воздействии твердых фракций веществ, содержащихся в золе и атмосферном воздухе, в зоне максимальных концентраций, формируемых выбросами ТЭС*

Table 2. Qualitative and quantitative parameters of non-carcinogenic (acute and chronic) and carcinogenic hazard of solid fractions of substances contained in fly ash and ambient air in the zone of maximum concentrations formed by emissions from the thermal power station*

Химическое вещество / Chemical	CAS	RFC, мг/м ³ / mg/m ³	Органы-мишени при хронической экспозиции / Target organs for chronic exposure	ARFC, мг/м ³ / mg/m ³	Органы-мишени при острой экспозиции / Target organs for acute exposure
Перечень веществ, учтенных в ведомостях инвентаризации / Chemicals included in air emissions inventory lists					
Взвешенные вещества / Suspended particles	–	0,075	ОД / RO	0,3	ОД, СД / RO, SE
Пыль неорганическая: 70–20 % SiO_2 / Inorganic dust: 70–20 % of SiO_2	–	0,1	ОД, ИС / RO, IS	–	–
Пыль неорганическая: до 20 % SiO_2 / Inorganic dust: up to 20 % of SiO_2	14464-46-1	0,05	ОД / RO	–	–
диЖелезо триоксид (Железа оксид) / diiron trioxide	1309-37-1	0,04	ОД / RO	–	–
Перечень веществ, содержащихся в золе и атмосферном воздухе, которые отсутствуют в инвентаризационных документах / Fly ash and other airborne chemicals not included in air emissions inventory lists					
Натрий и его соединения / Sodium and its compounds	1310-73-2	0,002	ОД, ОЗ / RO, VO	0,005	ОД, ОЗ / RO, VO
Магний и его соединения / Magnesium and its compounds	7439-95-4	–	–	–	–
Алюминий оксид / Aluminum oxide	1344-28-1	0,005	ОД, МТ / RO, BW	–	–
Взвешенные частицы PM_{10} / Particulate matter, PM_{10}	–	0,05	ОД, ССС, Р, СМ / RO, CVS, D, M	0,15	ОД, СД / RO, SE
Взвешенные частицы $\text{PM}_{2,5}$ / Particulate matter, $\text{PM}_{2,5}$	–	0,015	ОД, СМ / RO, M	0,065	ОД, СД / RO, SE

Примечание: ОД – органы дыхания; ИС – иммунная система; СД – системное действие; ССС – сердечно-сосудистая система; Р – развитие; ОЗ – органы зрения; МТ – масса тела; СМ – смертность. * – Калий, кальций, фосфор – в соответствии с Руководством по оценке риска (Р 2.1.10.1920–04), отсутствуют данные о референтных уровнях и формируемых эффектах на здоровье.

Notes: RO, respiratory organs; IS, immune system; SE, systemic effects; CVS, cardiovascular system; D, development; VO, visual organs; BW, body weight; M, mortality. * Potassium, calcium, phosphorus – in accordance with the Risk Assessment Guidelines (R 2.1.10.1920–04); no data on reference levels and health effects are available.

¹⁰ Р 2.1.10.1920–04 Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 143 с.

недооценены. Для более точной оценки воздействия ТЭС на здоровье населения целесообразным является уточнение данных инвентаризации на источниках с учетом полной классификации пылевых фракций и их дисперсного состава.

В настоящее время отсутствует система мониторинга частиц ультрамикроразмерного диапазона (до 1,0 мкм) в атмосферном воздухе, в этой связи отсутствует возможность объективной оценки степени воздействия данных частиц на здоровье населения.

Полученные результаты настоящего исследования согласуются с выводами других релевантных научных исследований, а описанные негативные эффекты со стороны здоровья в результате воздействия различных соединений твердых пылевых фракций подтверждают их токсическое действие. Научные исследования показали, что соединения железа, кремния, кальция, алюминия, калия, марганца, фториды, взвешенные частицы PM_{10} , $PM_{2,5}$ могут вызывать разнообразные специфические негативные реакции со стороны здоровья, в т. ч. заболевания дыхательной, сердечно-сосудистой, иммунной, кроветворной, костно-мышечной систем, новообразования [26–31].

Эффективное снижение выбросов твердых частиц в атмосферный воздух от тепловых электростанций может быть достигнуто рядом технических, технологических и управленческих решений, проведением систематического мониторинга качества атмосферного воздуха в зонах влияния ТЭС. Данные решения могут потребовать значительных инвестиционных вложений и изменений в производственных процессах. При этом реализация мер должна осуществляться не только с учетом экономической и технической целесообразности, но и с учетом формируемой потенциальной опасности и фактически причиняемого вреда здоровью населения [8, 32–35].

Выводы

1. В результате анализа дисперсного, компонентного и морфологического состава золы методом электронной микроскопии установлено, что основную долю частиц составляли кальций, магний, железо, кремний, алюминий, натрий, калий, сера, фосфор (более 59 %); более 50 % частиц имеют размер до 5,5 мкм; порядка 32 % частиц имеют более округлую форму (сферичность 0,7–1,0).

2. Компонентный, дисперсный и морфологический состав пылевых частиц атмосферного воздуха в зоне максимальных концентраций, формируемых выбросами исследуемой ТЭС, сопоставим с составом золы. Более 90 % твердых частиц воздуха составляют кальций, алюминий, калий, кремний, натрий, магний, железо, сера и фосфор. Порядка 50 % частиц атмосферного воздуха имеют сферичность 0,7–1,0.

3. В зоне максимальных концентраций, формируемых выбросами крупной ТЭС, по верифицированным и инструментальным данным регистрируются превышения гигиенических нормативов по 7 веществам твердого агрегатного состояния до 1,5–3,3 ПДК_{мр}, до 1,2–1,4 ПДК_{сс}, до 1,2–1,5 ПДК_{сг}.

4. Установленные уровни экспозиции идентифицированных веществ в твердой фракции формируют острый и хронический неканцерогенный

риск, выраженный коэффициентами опасности и классифицируемый как «высокий» и «настораживающий» – до 5,5 HQ_{ас} и до 2,4 HQ_{сг} соответственно. Повышенные индексы опасности формируются в отношении возникновения заболеваний органов дыхания, нервной, кроветворной, костно-мышечной систем (до 6,9 H_{сг} – высокий уровень). Суммарный уровень канцерогенного риска (CRT) формировался на уровне до $5,8 \times 10^{-5}$. В условиях повышенных уровней острого и/или хронического риска проживает более 25 тыс. человек.

5. Почти половина идентифицированных твердых примесей (натрий, магний, алюминий, кальций, калий и др.) отсутствует в инвентаризационных ведомостях исследуемой ТЭС и не определяется на ближайшем посту мониторинга. Данные компоненты обладают более широким спектром неканцерогенных эффектов на здоровье при ингаляционном поступлении в сравнении с не идентифицированными по составу пылями, дополнительно формируя нарушения органов зрения, сердечно-сосудистой системы, процессов развития, массы тела.

6. Результаты анализа качества атмосферного воздуха, основанные на информации из ведомостей инвентаризации и данных мониторинга, указывают на возможную недооценку уровней экспозиции и риска для здоровья, формируемых хозяйственной деятельностью объектов теплоэнергетики. Целесообразным является уточнение ведомостей инвентаризации, сосредоточение внимания на полном учете компонентов пылевых фракций, осуществление мониторинга приоритетных факторов риска и состояния здоровья населения в зонах воздействия данных хозяйствующих субъектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметшин Э.Р. Влияние энергетического загрязнения окружающей среды на продолжительность жизни человека // Молодой ученый. 2018. Т. 1. № 187. С. 48–52.
2. Zaitseva NV, May IV. Ambient air quality and health risks as objective indicators to estimate effectiveness of air protection in cities included into the 'Clean air' Federal project. *Health Risk Analysis*. 2023;(1):4–12. doi: 10.21668/health.risk/2023.1.01.eng
3. Нецветов А.Г. Правовая охрана атмосферного воздуха от загрязнения по законодательству Российской Федерации // Правовая безопасность личности, государства и общества: Сборник статей XIX Международной научной конференции. 2019. С. 108–116.
4. Рыбинская Е.Т. Негативное воздействие тепловой энергетики на окружающую среду в контексте реализации права на экологическую безопасность // Аграрное и земельное право. 2023. № 4 (220). С. 65–67. doi: 10.47643/1815-1329_2023_4_65
5. Ракитский В.Н., Авалиани С.Л., Новиков С.М. и др. Анализ риска здоровью при воздействии атмосферных загрязнений как составная часть стратегии уменьшения глобальной эпидемии неинфекционных заболеваний // Анализ риска здоровью. 2019. № 4. С. 30–36. doi:10.21668/health.risk/2019.4.03
6. Тихомирова Т.И., Хомутов С.А. Влияние вредных выбросов ТЭЦ на атмосферу // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования. 2019. С. 282–286.
7. Петров А.С., Самаркина А.Н. Исследование влияния объектов теплоэнергетики на окружающую среду // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. 2016. № 6–2 (87). С. 152–154.
8. Бахтиёрова Н.Б., Сулейменова Б.М. Влияние выбросов предприятий теплоэнергетики на окружающую среду и здоровье населения // Теория и практика современной науки. 2016. № 4 (10). С. 110–113.

9. Голиков Р.А., Кислицына В.В., Суржиков Д.В. и др. Оценка влияния загрязнения атмосферного воздуха выбросами предприятия теплоэнергетики на здоровье населения Новокузнецка // Медицина труда и промышленная экология. 2019. Т. 59. № 6. С. 348–352.
10. Снежко С.И., Шевченко О.Г. Источники поступления тяжелых металлов в атмосферу // Ученые записки. № 18. С. 57–69. doi: 10.31089/1026-9428-2019-6-348-352
11. Xing Y-F, Xu Y-H, Shi M-H, Lian Y-X. The impact of PM_{2.5} on the human respiratory system. *J Thorac Dis.* 2016;8(1):E69-74. doi: 10.3978/j.issn.2072-1439.2016.01.19
12. Кашуба Н.А. О новых подходах к оценке влияния пыли на органы дыхания // Гигиена и санитария. 2018. Т. 97. № 3. С. 264–268. doi:10.18821/0016-9900-2018-97-3-264-268
13. Saghaian SE, Azimian AR, Jalilvand R, Dadkhah S, Saghaian SM. 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. doi: 10.15761/BEM.1000155
14. Садеков Д.Р., Ермаченко А.Б., Котов В.С. Оценка заболеваемости работников производственной и непромышленной сфер старобешевской теплоэлектростанции с временной утратой трудоспособности // Архив клинической и экспериментальной медицины. 2022. Т. 31. № 1. С. 50–53.
15. Пашков Г.Л., Сайкова С.В., Кузьмин В.И. и др. Золы природных углей – нетрадиционный сырьевой источник редких элементов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2012. Т. 5. № 5. С. 520–530.
16. Черкасова Т.Г., Черкасова Е.В., Тихомирова А.В. и др. Угольные отходы как сырьё для получения редких и рассеянных элементов // Вестник КузГТУ. 2016. № 6. С. 185–188.
17. Бариева Э.Р., Королев Э.А., Серазеева Е.В. Состав и строение золы-уноса ТЭЦ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. № 5-6. С. 109–113.
18. Арсентьев В.А., Дмитриев С.В., Мезенин А.О. и др. Вещественный состав и технология сухой переработки золы ТЭЦ // Обогащение руд. 2015. № 4 (358). С. 49–53. doi: 10.17580/or.2015.04.09
19. Sun T, Zhang T, Xiang Y, et al. Application of data assimilation technology in source apportionment of PM_{2.5} during winter haze episodes in the Beijing-Tianjin-Hebei region in China. *Atmos Pollut Res.* 2022;13(10):101546. doi: 10.1016/j.apr.2022.101546
20. Katanoda K, Sobue T, Satoh H, et al. An association between long-term exposure to ambient air pollution and mortality from lung cancer and respiratory diseases in Japan. *J Epidemiol.* 2011;21(2):132-43. doi: 10.2188/jea.JE20100098
21. Zaitseva NV, Kiryanov DA, Kleyn SV, Tsinker MYu, Andriushunas AM. Distribution of micro-sized range solid particles in the human airways: Field experiment. *Gigiena i Sanitariya.* 2023;102(5):412-420. (In Russ.) doi: 10.47470/0016-9900-2023-102-5-412-420
22. Galvão ES, Santos JM, Goulart EV, Reis NC Jr. Health risk assessment of inorganic and organic constituents of the coarse and fine PM in an industrialized region of Brazil. *Sci Total Environ.* 2023;865:161042. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.161042
23. Liu S, Zhang C, Zhan J, et al. Source-specific health risk assessment of PM_{2.5} bound heavy metal in re-suspended fugitive dust: A case study in Wuhan metropolitan area, central China. *J Clean Prod.* 2022;379(1):134480. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134480
24. Rushingabigwi G, Nsengiyumva P, Sibomana L, Twizere C, Kalisa W. Analysis of the atmospheric dust in Africa: The breathable dust's fine particulate matter PM_{2.5} in correlation with carbon monoxide. *Atmos Environ.* 2020;224:117319. doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117319
25. Moreno T, Trechera P, Querol X, et al. Trace element fractionation between PM₁₀ and PM_{2.5} in coal mine dust: Implications for occupational respiratory health. *Int J Coal Geol.* 2019;203:52-59. doi: 10.1016/j.coal.2019.01.006
26. Мещакова Н.М., Меринов А.В., Шаяхметов С.Ф. и др. Оценка экспозиционных нагрузок химическими веществами у работников основных профессий алюминиевого производства Восточной Сибири // Медицина труда и промышленная экология. 2019. № 59 (7). С. 406–411. doi: 10.31089/1026-9428-2019-59-7-406-411
27. Бабанов С.А., Стрижаков Л.А., Лебедева М.В. и др. Пневмокониозы: современные взгляды // Терапевтический архив. 2019. № 91 (3). С. 107–113.
28. Rajagopalan S, Al-Kindi SG, Brook RD. Air pollution and cardiovascular disease: JACC state-of-the-art review. *J Am Coll Cardiol.* 2018;72(17):2054-2070. doi: 10.1016/j.jacc.2018.07.099
29. Казарезов А.А., Ларичкин В.В. Комплексная технология снижения вредных выбросов от угольных тепловых электростанций // Наука Промышленность Оборона. Труды XXIII Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 100-летию основания конструкторского бюро «Туполев». Под редакцией С.Д. Саленко. Новосибирск, 2022. С. 147–150.
30. Головтеева А.Н., Сиваковский А.М., Росляков П.В. Разработка программного комплекса оптимального выбора наилучших доступных технологий // Инфорино-2018. Материалы IV Международной научно-практической конференции. 2018. С. 273–277.
31. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Боровкова А.М. Нормативно-методическое обеспечение перехода на баты в теплоэнергетике // Теплоэнергетика. 2018. № 5. С. 85–92.
32. Andriushunas AM, Kleyn SV. Fuel and energy enterprises as objects of risk-oriented sanitary-epidemiologic surveillance. *Health Risk Analysis.* 2021;4(4):65-73. doi: 10.21668/health.risk/2021.4.07.eng

REFERENCES

1. Akhmetshin ER. [Impact of energy pollution of the environment on human life expectancy.] *Moloday Uchenyy.* 2018;(1(187)):48-52. (In Russ.)
2. Zaitseva NV, May IV. Ambient air quality and health risks as objective indicators to estimate effectiveness of air protection in cities included into the 'Clean air' Federal project. *Health Risk Analysis.* 2023;1(1):4-12. doi: 10.21668/health.risk/2023.1.01.eng
3. Netsvetaev AG. Right protection of atmosphere air from pollution according to the legislation of the Russian Federation. In: Arkhipova NI, Timofeeva SV, Knyazeva EYu, eds. *Legal Security of the Individual, State and Society: Proceedings of the XIX International Scientific Conference, Moscow, April 25, 2019.* Moscow: Russian State Humanitarian University Publ.; 2019:108-116. (In Russ.)
4. Rybinskaya ET. Negative impact of thermal energy on the environment in the context of the realization of the right to environmental safety. *Agrarnoe i Zemel'noye Pravo.* 2023;4(220):65-67. (In Russ.) doi: 10.47643/1815-1329_2023_4_65
5. Rakitskii VN, Avaliani SL, Novikov SM, Shashina TA, Dodina NS, Kisilitsin VA. Health risk analysis related to exposure to ambient air contamination as a component in the strategy aimed at reducing global non-infectious epidemics. *Health Risk Analysis.* 2019;4(4):30-36. (In Russ.) doi: 10.21668/health.risk/2019.4.03.eng
6. Tikhomirova TI, Khomutov SA. [Impact of emissions of the combined heat and power plant on the atmosphere.] In: *Environmental Safety and Protection: Fundamental and Applied Studies: Proceedings of the Russian Scientific Conference, Belgorod, October 14–18, 2019.* Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov Publ.; 2019;2:282-286. (In Russ.)
7. Petrov AS, Samarkina AN. [Study of the impact of heat power engineering facilities on the environment.] *Novaya Nauka: Teoreticheskiy i Prakticheskiy Vzgl'yad.* 2016;(6-2(87)):152-154. (In Russ.)
8. Bakhtiyorova NB, Suleimenova BM. [Influence of emissions of heat power enterprises on the environment and public health.] *Teoriya i Praktika Sovremennoy Nauki.* 2016;(4(10)):110-113. (In Russ.)
9. Golikov RA, Kisilitsyna VV, Surzhikov DV, Oleshchenko AM, Mukasheva MA. Assessment of the impact of air pollution by heat power plant emissions on the health of the population of Novokuznetsk. *Meditsina Truda i Promyshlennaya Ekologiya.* 2019;(6):348-352. (In Russ.) doi: 10.31089/1026-9428-2019-6-348-352
10. Snizhko SI, Shevchenko OG. Emission sources of heavy metals to the atmosphere. *Uchenye Zapiski Rossiyskogo Gosudarstvennogo Gidrometeorologicheskogo Universiteta.* 2011;(18):57-69. (In Russ.)
11. Xing Y-F, Xu Y-H, Shi M-H, Lian Y-X. The impact of PM_{2.5} on the human respiratory system. *J Thorac Dis.* 2016;8(1):E69-74. doi: 10.3978/j.issn.2072-1439.2016.01.19
12. Kashuba NA. About new approaches in the estimation of the impact of dust on the respiratory system. *Gigiena i Sanitariya.* 2018;97(3):264-268. (In Russ.) doi: 10.18821/0016-9900-2018-97-3-264-268
13. Saghaian SE, Azimian AR, Jalilvand R, Dadkhah S, Saghaian SM. Computational analysis of airflow and particle deposition

<https://doi.org/10.35627/2219-5238/2023-31-12-37-45>

Original Research Article

- fraction in the upper part of the human respiratory system. *Biol Eng Med*. 2018;3(6):6-9. doi: 10.15761/BEM.1000155
14. Sadekov DR, Ermachenko AB, Kotov VS. Estimation of morbidity of employees in production and non-production spheres of Starobeshevsk power plant with time loss of employment. *Arkhiv Klinicheskoy i Eksperimental'noy Meditsiny*. 2022;31(1):50-53. (In Russ.)
 15. Pashkov GL, Saikova SV, Kuzmin VI, Panteleeva MV, Kokorina AN, Linok EV. Natural coal ash – Unconventional source of rare elements. *Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo Universiteta. Tekhnika i Tekhnologii*. 2012;5(5):520-530. (In Russ.)
 16. Cherkasova TG, Cherkasova YeV, Tikhomirova AV, Bobrovnikova AA, Nevedrov AV, Papin AV. Coal waste as raw material for production of rare and trace elements. *Vestnik Kuzbasskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2016;6(118):159-163. (In Russ.)
 17. Barieva ER, Korolev EA, Serazeeva EV. [Composition and structure of fly ash from thermal power station.] *Problemy Energetiki*. 2012;5(6):109-113. (In Russ.)
 18. Arsent'ev VA, Dmitriev SV, Mezenin AO, Kotova EL. Material composition of ashes from combined heat and power plants and the technology for its disposal. *Obogashchenie Rud*. 2015;4(358):49-53. (In Russ.) doi: 10.17580/or.2015.04.09
 19. Sun T, Zhang T, Xiang Y, et al. Application of data assimilation technology in source apportionment of PM_{2.5} during winter haze episodes in the Beijing-Tianjin-Hebei region in China. *Atmos Pollut Res*. 2022;13(10):101546. doi: 10.1016/j.apr.2022.101546
 20. Katanoda K, Sobue T, Satoh H, et al. An association between long-term exposure to ambient air pollution and mortality from lung cancer and respiratory diseases in Japan. *J Epidemiol*. 2011;21(2):132-43. doi: 10.2188/jea.JE20100098
 21. Zaitseva NV, Kiryanov DA, Kleyn SV, Tsinker MYu, Andrishunas AM. Distribution of micro-sized range solid particles in the human airways: Field experiment. *Gigiena i Sanitariya*. 2023;102(5):412-420. (In Russ.) doi: 10.47470/0016-9900-2023-102-5-412-420
 22. Galvão ES, Santos JM, Goulart EV, Reis NC Jr. Health risk assessment of inorganic and organic constituents of the coarse and fine PM in an industrialized region of Brazil. *Sci Total Environ*. 2023;865:161042. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.161042
 23. Liu S, Zhang C, Zhan J, et al. Source-specific health risk assessment of PM_{2.5} bound heavy metal in re-suspended fugitive dust: A case study in Wuhan metropolitan area, central China. *J Clean Prod*. 2022;379(1):134480. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134480
 24. Rushingabigwi G, Nsengiyumva P, Sibomana L, Twizere C, Kalisa W. Analysis of the atmospheric dust in Africa: The breathable dust's fine particulate matter PM_{2.5} in correlation with carbon monoxide. *Atmos Environ*. 2020;224:117319. doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117319
 25. Moreno T, Trechera P, Querol X, et al. Trace element fractionation between PM₁₀ and PM_{2.5} in coal mine dust: Implications for occupational respiratory health. *Int J Coal Geol*. 2019;203:52-59. doi: 10.1016/j.coal.2019.01.006
 26. Meshchakova NM, Merinov AV, Shayakhmetov SF, Lisetskaya LG. Assessment of exposure loads of chemicals in workers of the main professions of aluminum production in Eastern Siberia. *Meditsina Truda i Promyshlennaya Ekologiya*. 2019;59(7):406-411. (In Russ.) doi: 10.31089/1026-9428-2019-59-7-406-411
 27. Babanov SA, Strizhakov LA, Lebedeva MV, Fomin VV, Budash DS, Baikova AG. Pneumocystosis: Modern view. *Terapevticheskiy Arkhiv*. 2019;91(3):107-113. (In Russ.) doi: 10.26442/00403660.2019.03.000066
 28. Rajagopalan S, Al-Kindi SG, Brook RD. Air pollution and cardiovascular disease: JACC state-of-the-art review. *J Am Coll Cardiol*. 2018;72(17):2054-2070. doi: 10.1016/j.jacc.2018.07.099
 29. Kazarezov AA, Larichkin VV. Integrated technology to reduce harmful emissions from coal-fired thermal power plants. In: Salenko SD, ed. *Science. Industry, Defense: Proceedings of the XXIII Russian Scientific and Technical Conference Dedicated to the Centenary of the Tupolev Design Department, Novosibirsk, April 20-22, 2022*. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University Publ.; 2022;3:147-150. (In Russ.)
 30. Golovteeva AN, Sivakovskiy AM, Roslyakov PV. [Development of a software complex of the optimal choice of the best available technologies.] In: *Computerization of Engineering Education (INFORINO-2018): Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, Moscow, October 23-26, 2018*. Moscow: National Research University Moscow Power Engineering Institute Publ.; 2018:273-277. (In Russ.)
 31. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Borovkova AM. Regulatory and methodical support of the transition to the BATs in heat power engineering. *Teploenergetika*. 2018;65(5):85-92. (In Russ.)
 32. Andrishunas AM, Kleyn SV. Fuel and energy enterprises as objects of risk-oriented sanitary-epidemiologic surveillance. *Health Risk Analysis*. 2021;4(4):65-73. doi: 10.21668/health.risk/2021.4.07.eng

Сведения об авторах:

Зайцева Нина Владимировна – академик РАН, д.м.н., профессор, научный руководитель; e-mail: znv@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2356-1145>.

Клейн Светлана Владиславовна – профессор РАН, д.м.н., заведующая отделом системных методов санитарно-гигиенического анализа и мониторинга; e-mail: kleyn@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2534-5713>.

✉ **Андрешунас** Алена Мухаматовна – младший научный сотрудник отдела системных методов санитарно-гигиенического анализа и мониторинга; e-mail: ama@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0072-5787>.

Балашов Станислав Юрьевич – старший научный сотрудник – руководитель ГИС-группы отдела системных методов санитарно-гигиенического анализа и мониторинга; e-mail: stas@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6923-0539>.

Информация о вкладе авторов: концепция исследования, редактирование: *Зайцева Н.В.*; дизайн исследования, написание текста, редактирование: *Клейн С.В.*; сбор и обработка материала, написание текста: *Андрешунас А.М.*; написание текста: *Балашов С.Ю.* Все авторы ознакомились с результатами работы и одобрили окончательный вариант рукописи.

Соблюдение этических стандартов: данное исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Финансирование: исследование проведено без спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: соавтор статьи Зайцева Н.В. является членом редакционной коллегии научно-практического журнала «Здоровье населения и среда обитания», остальные соавторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Статья получена: 12.11.23 / Принята к публикации: 11.12.23 / Опубликовано: 29.12.23

Author information:

Nina V. Zaitseva, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Med.), Professor, Scientific Director; e-mail: znv@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2356-1145>.

Svetlana V. Kleyn, Professor of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Med.), Head of the Department of System Methods of Sanitary and Hygienic Analysis and Monitoring; e-mail: kleyn@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2534-5713>.

✉ **Alena M. Andrishunas**, Junior Researcher, Department of System Methods of Sanitary and Hygienic Analysis and Monitoring; e-mail: ama@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0072-5787>.

Stanislav Yu. Balashov, Senior Researcher, Head of the GIS Group, Department of System Methods of Sanitary and Hygienic Analysis and Monitoring; e-mail: stas@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6923-0539>.

Author contributions: study conception, editing: *Zaitseva N.V.*; study design, draft manuscript preparation, editing: *Kleyn S.V.*; data collection and processing, draft manuscript preparation: *Andrishunas A.M.*; draft manuscript preparation: *Balashov S.Yu.* All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

Compliance with ethical standards: Not applicable.

Funding: This research received no external funding.

Conflict of interest: The co-author of the article Nina V. Zaitseva is a member of the editorial board of the scientific and practical journal *Public Health and Life Environment*; other authors have no conflicts of interest to declare.

Received: November 12, 2023 / Accepted: December 11, 2023 / Published: December 30, 2023