https://doi.org/10.35627/2219-5238/2024-32-10-36-44
Оригинальная исследовательская статья

ГИГИЕНА ТРУДА

© Коллектив авторов, 2024

УДК 614.715 + 613.633

Check for updates

Состояние артерий у работников предприятий по производству минеральных удобрений при воздействии твердых частиц мелкодисперсных фракций пыли

А.Е. Носов, А.С. Байдина, А.С. Зорина, Е.А. Сухих, А.А. Крылов, В.М. Чигвинцев

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

Резюме

Введение. Одним из техногенных загрязнителей производственной среды является мелкодисперсная пыль, повышающая риск развития у работников негативных кардиоваскулярных событий.

Цель исследования. Оценить структурно-функциональные характеристики артерий у работников, подвергающихся хроническому аэрогенному воздействию мелкодисперсной пыли.

Материалы и методы. Обследован 161 работник, подвергающийся аэрогенному воздействию мелкодисперсной пыли (группа наблюдения). Группу сравнения составили 82 работника администрации предприятия. Исследование одномоментное поперечное (сентябрь 2020 г.). Стандартными методами выполнено изучение толщины комплекса интима-медиа брахиоцефальных артерий (142 человека группы наблюдения и 78 – группы сравнения), оценка эндотелиальной функции (94 и 70 соответственно) и жесткости стенки плечевой артерии (150 и 65 соответственно). Содержание мелкодисперсных частиц в воздухе определяли прямым методом на анализаторе DustTrak 8533. Статистическая обработка выполнена по программе SPSS 23. Для сравнения количественных показателей использован критерий Манна – Уитни, качественных – хи-квадрат. Связь нарушений эндотелиальной функции с концентрацией мелкодисперсной пыли в воздухе устанавливалась методом логистической регрессии.

Результаты. Выявлены превышения концентраций мелкодисперсных фракций пыли в воздухе рабочей зоны группы наблюдения относительно группы сравнения: от 76 раз – для PM_{10} до 357 – для PM_1. В группе наблюдения относительный прирост диаметра плечевой артерии (12,7 % против 16,1 %) и коэффициент чувствительности эндотелия (0,08 у.е. против 0,14 у.е.) были достоверно ниже аналогичных в группе сравнения (p = 0,0001–0,006); чаще регистрировалась эндотелиальная дисфункция (28 человек – 29,8 % против 9–12,9 %, p = 0,003), а индекс аугментации на плечевой артерии имел большие значения (1,02 (0,91;1,15) против 0,96 (0,87;1,06), p = 0,006). Установлена достоверная связь повышения в воздухе концентрации мелкодисперсных фракций пыли с увеличением вероятности развития эндотелиальной дисфункции (R^2 = 0,37–0,4).

Выводы. Повышенное содержание в воздухе рабочей зоны мелкодисперсных фракций пыли увеличивает вероятность развития у работников эндотелиальной дисфункции и нарастания жесткости артерий с вкладом профессионального фактора до 37–40 %. Снижение запыленности воздуха рабочей зоны до гигиенических нормативов является значимой мерой профилактики сердечно-сосудистой патологии у работников.

Ключевые слова: воздух рабочей зоны, мелкодисперсные частицы, растяжимость артерий, атеросклероз артерий, эндотелиальная дисфункция.

Для цитирования: Носов А.Е., Байдина А.С., Зорина А.С., Сухих Е.А., Крылов А.А., Чигвинцев В.М. Состояние артерий у работников предприятий по производству минеральных удобрений при воздействии твердых частиц мелкодисперсных фракций пыли // Здоровье населения и среда обитания. 2024. Т. 32. № 10. С. 36–44. doi: 10.35627/2219-5238/2024-32-10-36-44

Artery Status in Mineral Fertilizer Industry Workers Occupationally Exposed to Particulate Matter

Alexander E. Nosov, Anastasia S. Baidina, Anastasiya S. Zorina, Ekaterina A. Sukhikh, Alexey A. Krylov, Vladimir M. Chigvintsev

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

Summary

Introduction: Particulate matter is one of the anthropogenic pollutants of the occupational environment that increases the risk of adverse cardiovascular events in workers.

Objective: To assess structural and functional characteristics of arteries in workers with chronic exposure to airborne particulate matter.

Materials and methods: In September 2020, we conducted a cross-sectional study involving 161 workers occupationally exposed to airborne particulate matter (observation group) and 82 administrative employees (reference group). Standard methods were used to measure intima-media thickness of the brachiocephalic trunk (in 142 blue and 78 white-collar workers), assess endothelial function (in 94 and 70), and brachial artery wall stiffness (in 150 and 65 workers, respectively). Airborne particle concentrations were measured using a DustTrak 8533 analyzer. Statistical analysis was performed with SPSS 23. The Mann - Whitney and chi-square tests were used to compare quantitative and qualitative indicators, respectively. The relationship between dust exposure and endothelial dysfunction was established using logistic regression.

Results: Workplace air concentrations of fine particles measured for the observation group were significantly higher than those for the reference group: from 76 times for PM_{10} to 357 times for PM_1. In the observation group, the relative increase in the brachial artery diameter (12.7 % versus 16.1 %) and the endothelial sensitivity index (0.08 versus 0.14 conventional units) were significantly lower than in the reference group (p = 0.0001 to 0.006); endothelial dysfunction was more prevalent (28 (29.8 %) versus 9 (12.9 %) workers, p = 0.003), and the brachial augmentation index was higher (1.02 (0.91; 1.15) versus 0.96 (0.87; 1.06), p = 0.006). We established a statistical relationship between higher airborne particle concentrations and increased likelihood of endothelial dysfunction (R^2 = 0.37–0.4).

Conclusions: High levels of particulate matter in the occupational environment enhance the likelihood of endothelial dysfunction and increased arterial stiffness with the estimated contribution of 37–40 %. Effective dust control measures are essential for prevention of cardiovascular diseases in industrial workers.

Keywords: workplace air, fine particles, arterial distensibility, arterial atherosclerosis, endothelial dysfunction.

Cite as: Nosov AE, Baidina AS, Zorina AS, Sukhikh EA, Krylov AA, Chigvintsev VM. Artery status in mineral fertilizer industry workers occupationally exposed to particulate matter. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2024;32(10):36–44. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2024-32-10-36-44

https://doi.org/10.35627/2219-5238/2024-32-10-36-44
Original Research Article

Введение. Одним из основных загрязнителей производственной среды предприятий по производству минеральных удобрений является мелкодисперсная пыль, способная адсорбировать на своей поверхности вредные химические соединения, такие как формальдегид, полициклические ароматические углеводороды, тяжелые металлы и их соединения и др. Мелкодисперсные частицы, обозначаемые как PM (от англ. particulate matter – «взвешенные частицы»), за счет своего размера долгое время находятся в воздухе во взвешенном состоянии и при вдыхании могут достигать бронхиол и альвеол, приводя к механическому повреждению сосудов [1–3]. Воздействие промышленных пылегазовых аэрозолей является одной из ведущих причин возникновения профессиональных заболеваний работающего населения. Под воздействием мелкодисперсных частиц слизистая оболочка верхних дыхательных путей снижает свои защитные функции, в связи с этим мелкодисперсные частицы проникают в более глубокие дыхательные пути [3–5]. При этом в нашей стране показатели PM не используются в оценке условий труда на рабочем месте. Показатели PM_1, $PM_{2,5}$, PM_{10} обычно используются для оценки качества атмосферного воздуха. PM_4 является показателем респирабельной фракции пыли в воздухе рабочей зоны, который используется за рубежом.

В последние годы повышение концентрации взвешенных частиц в воздухе рассматривается как фактор риска сердечно-сосудистых заболеваний, что подтверждается многочисленными исследованиями [6–10]. Установлено, что PM могут проходить через стенки сосудов, попадая непосредственно в кровоток и повреждая тем самым сосудистую систему [11, 12]. Ранее проведенными исследованиями подтверждено, что экспозиция аэрополлютантами приводит к вазоконстрикции, эндотелиальной дисфункции и последующим структурным изменениям артериального русла, которые играют главную роль в патогенезе сердечно-сосудистых заболеваний [13–17]. Таким образом, для разработки эффективных мероприятий по профилактике сердечно-сосудистых заболеваний, ассоциированных с воздействием взвешенных частиц в условиях промышленного производства, необходимо проведение всесторонней оценки факторов риска здоровью работающих.

Цель исследования – изучить влияние аэрогенного воздействия мелкодисперсных фракций пыли воздуха рабочей зоны на структурно-функциональные характеристики артерий работников, осуществляющих деятельность в условиях воздействия взвешенных частиц.

Ограничение исследования. Исследование проводилось одномоментным по времени периодом отбора проб воздуха рабочей зоны, отсутствием оценки факторов образа жизни, недостаточным количеством данных для исследования кумулятивного действия пыли и построения модели с учетом доза-зависимого эффекта. Проведен замер не только респирабельных фракций мелкодисперсных частиц, но и частиц размером до 15 мкм.

Материалы и методы. Проведено одномоментное поперечное обследование (сентябрь 2020 г.) 161 работника 2 предприятий по производству минеральных удобрений (группа наблюдения), осуществляющих трудовую деятельность в условиях воздействия вредных производственных факторов, включающих мелкодисперсные частицы (по данным СОУТ класс условий труда 3.1–3.2 – воздействие пыли хлорида калия, химического фактора). В группу сравнения вошли 82 сотрудника управленческого аппарата предприятий, работающих в допустимых условиях труда без вредных факторов производства. Группы были сопоставимы по полу, возрасту, стажу работы, статусу курения, артериальной гипертензии. Средний возраст работников группы наблюдения составил 42,8 ± 10,3 года, средний стаж: 16,7 ± 11,5 года. В группе наблюдения 127 женщин и 34 мужчины. Средний возраст группы сравнения – 45,5 ± 9,7 года (p = 0,06), средний стаж – 19,7 ± 11,3 года (p = 0,07). В группе сравнения 64 женщины и 18 мужчин (p = 0,882). Курили в группе наблюдения 29,1 %, а в группе сравнения – 21,7 % (p = 0,13). Наличие в анамнезе артериальной гипертензии в группе наблюдения отмечено у 24,8 %, а в группе сравнения – у 21,9 % обследованных (p = 0,62).

Проведены: клинический осмотр кардиологом, ультразвуковое дуплексное сканирование плечевой и брахиоцефальных артерий, сфигмоманометрия, изучена эндотелий зависимая вазодилатация (ЭЗВД) плечевой артерии.

Исследование жесткости артериальной стенки выполнено с помощью сфигмометра VaSera VS-1500N (Fukuda Denshi CO., LTD) с оценкой CAVI (сердечно-лодыжечный сосудистый индекс), AI (индекс аугментации на плечевой артерии), лодыжечно-плечевого индекса (ABI) у 150 человек группы наблюдения и 65 человек группы сравнения.

Эндотелий зависимую вазодилатацию исследовали у 94 человек группы наблюдения и 70 человек группы сравнения по методике D.S. Celermajer и соавторов (1992 г.). Исследование эндотелий зависимой вазодилатации плечевой артерии выполнялось на системе ультразвуковой диагностики экспертного класса Vivid q (GE Vingmed Ultrasound AS, зав. номер 050758Vq) с использованием линейного матричного датчика (4,0–13,0 МГц) по модифицированной методике D.S. Celermajer et al. и соавторов (1992 г.) [18]. Диаметр плечевой артерии и максимальную скорость кровотока измеряли в продольном сечении на 2–5 см выше локтевого сгиба в состоянии покоя за 30 с до компрессии, вызванной с помощью манжеты сфигмоманометра, наложенной выше места визуализации плечевой артерии и накачанной до давления, на 50 мм рт. ст. превышающего систолическое. Продолжительность компрессии составляла 5 мин. Диаметр плечевой артерии и максимальную скорость кровотока определяли на 60-й секунде после удаления воздуха из манжеты. Изменения диаметра сосуда оценивали в процентном отношении к исходной величине. За нормальную реакцию плечевой артерии принималось ее расширение на 10 и более процентов от исходного уровня. Меньший прирост или вазоконстрикция трактовались как нарушение функции эндотелия. Для оценки функции эндотелия также использовался

https://doi.org/10.35627/2219-5238/2024-32-10-36-44
Оригинальная исследовательская статья

показатель «чувствительность плечевой артерии к изменению сдвига на эндотелий», характеризующий чувствительность эндотелия к изменению скорости кровотока и способность регулировать диаметр сосуда;

Расчет коэффициента чувствительности плечевой артерии производился по формуле:

$$K = \frac{rD}{Do} / \frac{r\tau}{\tau o}, \quad (1)$$

где *K* – коэффициент чувствительности плечевой артерии к изменению механического стимула, *rD* – разница между диаметром артерии после декомпрессии и исходным диаметром, *Do* – исходный диаметр артерии, *rτ* – разница напряжения сдвига на эндотелий после декомпрессии и исходным значением, *τo* – напряжение сдвига на эндотелий исходное, рассчитанное по формуле: $\tau = 4\eta V/D$, где *η* – вязкость крови (в среднем 0,05 Пз); *V* – максимальная скорость кровотока, см/сек; *D* – диаметр артерии, см.

Ультразвуковое исследование брахиоцефальных артерий проводили с использованием линейного матричного датчика (4,0–13,0 МГц) на системе ультразвуковой диагностики Vivid q (GE Vingmed Ultrasound AS) у 142 человек группы наблюдения и 78 человек группы сравнения. Оценивалась толщина комплекса интима-медиа (ТКИМ), наличие атеросклеротических бляшек. В соответствии с рекомендациями Американского общества эхокардиографии, при исследовании брахиоцефальных артерий за норму толщины комплекса интима-медиа (ТКИМ) принималась ее толщина менее 75 процентиля для соответствующего возраста и пола: в возрасте менее 40 лет у мужчин и женщин менее 0,7 мм, у мужчин в возрасте 40–50 лет и у женщин в возрасте 40–60 лет менее 0,8 мм, у мужчин старше 50 лет и женщин старше 60 лет ≤ 0,9 мм [19].

Различное количество исследований обусловлено временными ограничениями. Поскольку исследования эндотелий зависимой вазодилатации занимает в среднем в 4 раза больше времени, в условиях массового обследования было принято решение о сокращении количества некоторых исследований. Отбор проводился случайным образом: медрегистратор ставил метку на карте согласно планируемому количеству исследований.

Определение содержания PM в воздухе рабочей зоны выполнялось на рабочих местах непосредственно во время производственного процесса анализатором аэрозоля DustTrak 8533 (TSI Incorporated). Отбор проб проводился в соответствии с ГОСТ 12.1.005–88[1]. Длительность отбора составила 5–10 минут в зависимости от визуальной запыленности на точке отбора.

Для сравнительной оценки проведены замеры по определению концентраций мелкодисперсных фракций пыли в воздухе рабочих мест работников, осуществляющих трудовую деятельность в помещениях, изолированных от основного производства, в связи с тем, что в Российской Федерации на данный момент не разработаны нормативы по содержанию PM в воздухе рабочей зоны.

Статистическая обработка проводилась с применением программы SPSS 23. Данные для концентраций фракций пыли представлены в виде среднего арифметического и стандартного отклонения, данные ТКИМ и показатели артериальной жесткости – в виде медианы и межквартильного размаха. Сравнение количественных показателей осуществлялось по критерию Манна – Уитни, качественных – по критерию хи-квадрат.

Оценка параметров парной модели, отражающей зависимость относительного прироста диаметра плечевой артерии от концентраций пылевых мелкодисперсных фракций, проводилась методом построения логистической регрессионной модели:

$$p = \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + b_1 \cdot x)}}, \quad (2),$$

где *p* – вероятность отклонения показателя «Относительный прирост диаметра плечевой артерии» от нормы;

x – уровень пылевой экспозиции мелкодисперсных фракций, мг/м^3;

b_0, b_1 – коэффициенты логистической регрессионной модели.

Определение параметров математической модели (b_0, b_1) производится методом наименьших квадратов с применением пакета Statistica 10. Достаточным уровнем значимости для статистических процедур считали $p < 0,05$.

Результаты. Результаты выполненных замеров массовой концентрации мелкодисперсных частиц PM_1, $PM_{2,5}$, PM_4, PM_{10} и PM_{15} в воздухе рабочей зоны на рабочих местах работников предприятий № 1 и 2 и воздухе административного помещения приведены в таблицах 1 и 2.

Результаты исследования воздуха рабочей зоны предприятия по производству минеральных удобрений показали, что на всех 7 исследованных рабочих местах предприятия № 1 уровни содержания пылевых мелкодисперсных фракций были выше относительно помещения сравнения. При этом содержание фракции PM_1 выше относительно рабочего места сравнения от 38 до 357 раз, фракции $PM_{2,5}$ – от 19 до 164 раз, фракции PM_4 – от 20 до 178 раз, фракции PM_{10} – от 8 до 76 раз. Максимальное содержание мелкодисперсных фракций пыли зафиксировано на рабочих местах аппаратчика флотационного процесса, фильтровальщика, машиниста мельниц.

На предприятии № 2 из восьми исследованных рабочих мест на семи установлено повышенное содержание мелкодисперсной пыли. При этом содержание фракции PM_1 выше относительно рабочего места сравнения от 15 до 312 раз, фракции $PM_{2,5}$ – от 7 до 128 раз, фракции PM_4 – от 7 до 130 раз, фракции PM_{10} – от 3 до 50 раз. Максимальное содержание мелкодисперсной пыли в воздухе рабочей зоны зафиксировано на рабочих местах

[1] ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://helpeng.ru/public/normdoc/ssbt/gost_12.1.005-88_1.pdf (дата обращения: 15.06.2024).

https://doi.org/10.35627/2219-5238/2024-32-10-36-44
Original Research Article

Таблица 1. **Массовые концентрации мелкодисперсных фракций пыли в воздухе рабочей зоны на рабочих местах предприятий № 1, 2**

Table 1. **Mass concentrations of particulate matter fractions measured in the workplace air of factories 1 and 2**

Номер точки обследования, рабочее место / Measurement point number, workplace	Массовые концентрации мелкодисперсных фракций пыли мг/м³ / Mass concentrations of PM fractions, mg/m³				
	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_4	PM_{10}	PM_{15}
Предприятие № 1 / Factory 1					
Т.1. Аппаратчик флотационного процесса / P.1. Flotation process operator	1,43 ± 0,29	1,64 ± 0,33	1,78 ± 0,36	2,29 ± 0,46	2,76 ± 0,55
Т.2. Фильтровальщик сменный / P.2. Shift filterman	0,92 ± 0,18	1,05 ± 0,21	1,16 ± 0,23	1,59 ± 0,32	1,79 ± 0,36
Т.3. Машинист смесительной установки гидрозакладки / P.3. Hydraulic filling mixing plant operator	0,80 ± 0,16	0,89 ± 0,18	1,00 ± 0,20	1,76 ± 0,35	2,32 ± 0,46
Т.4. Центрифуговщик / P.4. Centrifuge operator	0,67 ± 0,13	0,78 ± 0,16	0,83 ± 0,17	0,97 ± 0,19	1,06 ± 0,21
Т.5. Машинист мельниц сменный / P.5. Shift grinding machine operator	1,32 ± 0,26	1,56 ± 0,31	1,69 ± 0,34	2,09 ± 0,42	2,39 ± 0,48
Т.6. Аппаратчик сгустителей / P.6. Flocculation plant operator	0,57 ± 0,11	0,64 ± 0,13	0,70 ± 0,14	0,93 ± 0,19	1,13 ± 0,23
Т.7. Машинист компрессорных установок / P.7. Compressor unit operator	0,18 ± 0,04	0,19 ± 0,04	0,20 ± 0,04	0,23 ± 0,05	0,27 ± 0,05
Предприятие № 2 / Factory 2					
Т.1. Аппаратчик измельчения отделения обогащения / P.1. Enrichment department grinding operator	0,70 ± 0,14	0,75 ± 0,15	0,79 ± 0,16	0,94 ± 0,19	1,11 ± 0,22
Т.2. Аппаратчик флотационного процесса / P.2. Flotation process operator	0,53 ± 0,11	0,58 ± 0,12	0,63 ± 0,13	0,76 ± 0,15	0,87 ± 0,17
Т.3. Центрифуговщик сменный 3 и 4 разряда / P.3. Shift centrifuge operator of grades 3 and 4	0,41 ± 0,08	0,46 ± 0,09	0,49 ± 0,10	0,55 ± 0,11	0,62 ± 0,12
Т.4. Центрифуговщик сменный 4 разряда / P.4. Shift centrifuge operator of grade 4	0,33 ± 0,07	0,37 ± 0,08	0,40 ± 0,08	0,50 ± 0,10	0,63 ± 0,13
Т.5. Аппаратчик вакуум-насосного отделения / P.5. Vacuum pump department operator	0,44 ± 0,09	0,46 ± 0,09	0,47 ± 0,09	0,50 ± 0,10	0,52 ± 0,10
Т.6. Машинист мостового крана / P.6. Overhead crane operator	0,39 ± 0,08	0,45 ± 0,09	0,49 ± 0,10	0,70 ± 0,14	0,96 ± 0,19
Т.7. Аппаратчик сушильного отделения / P.7. Drying department operator	1,25 ± 0,25	1,28 ± 0,26	1,30 ± 0,26	1,49 ± 0,30	2,15 ± 0,43
Т.8. Аппаратчик приготовления реагентов / P.8. Reagent preparation operator	0,06 ± 0,01	0,07 ± 0,01	0,07 ± 0,02	0,09 ± 0,02	0,12 ± 0,02

Таблица 2. **Массовые концентрации мелкодисперсных фракций пыли в воздухе административного помещения, изолированного от производства**

Table 2. **Mass concentrations of particulate matter fractions measured in the workplace air of administrative premises isolated from production**

Номер точки обследования, рабочее место / Measuring point number, workplace	Массовые концентрации мелкодисперсных фракций пыли мг/м³ / Mass concentrations of PM fractions, mg/m³				
	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_4	PM_{10}	PM_{15}
Т.1. Специалист отдела пропусков / Permit specialist	0,004 ± 0,001	0,010 ± 0,002	0,010 ± 0,002	0,030 ± 0,010	0,090 ± 0,020

аппаратчика измельчения отделения обогащения, аппаратчика сушильного отделения.

Оценка доли каждой фракции мелкодисперсных частиц в воздухе рабочей зоны показала различие каждой фракции мелкодисперсных частиц на рабочих местах на производстве и в помещении сравнения (таблица 3).

На основных производственных участках предприятий № 1 и 2 в воздухе рабочих мест преобладает фракция мелкодисперсной пыли размером до 1 мкм (PM_1), что составляет в среднем 57% от общей концентрации пыли. В воздухе рабочих мест административного помещения наибольшая доля мелкодисперсной пыли приходится на фракции размером PM_{10} и PM_{15}, что составляет 20,7 % и 66,7 % соответственно.

Ультразвуковое исследование ЭЗВД показало, что в группе наблюдения были статистически

https://doi.org/10.35627/2219-5238/2024-32-10-36-44
Оригинальная исследовательская статья

Таблица 3. **Вклад фракций мелкодисперсных частиц в воздухе рабочей зоны на рабочих местах предприятий № 1, 2 и помещения сравнения**

Table 3. **Proportions of particulate matter fractions measured in the workplace air of factories 1 and 2 and the reference room**

Номер точки обследования, рабочее место / Measurement point number, workplace	Доля мелкодисперсных фракций пыли, % / Proportion of PM fractions, %				
	PM_1	$PM_{2,5}$	PM_4	PM_{10}	PM_{15}
Предприятие № 1 / Factory 1					
Т1. Аппаратчик флотационного процесса / P.1. Flotation process operator	51,7	7,6	5,1	18,5	17,2
Т.2. Фильтровальщик сменный / P.2. Shift filterman	51,1	7,5	6,2	24,0	11,2
Т.3. Машинист смесительной установки гидрозакладки / P.3. Hydraulic filling mixing plant operator	34,4	4,1	4,5	32,8	24,1
Т.4. Центрифуговщик / P.4. Centrifuge operator	63,1	10,4	4,7	13,0	8,8
Т.5. Машинист мельниц сменный / P.5. Shift grinding machine operator	55,2	10,0	5,4	16,7	12,6
Т.6. Аппаратчик сгустителей / P.6. Flocculation plant operator	50,6	6,1	5,0	20,6	17,6
Т.7. Машинист компрессорных установок / P.7. Compressor unit operator	67,2	4,1	2,6	10,3	15,9
Предприятие № 2 / Factory 2					
Т.1. Аппаратчик измельчения отделения обогащения / P.1. Enrichment department grinding operator	63,2	4,4	3,2	13,8	15,3
Т.2. Аппаратчик флотационного процесса / P.2. Flotation process operator	60,8	6,6	5,0	15,3	12,4
Т.3. Центрифуговщик сменный 3 и 4 разряда / P.3. Shift centrifuge operator of grades 3 and 4	65,9	9,1	4,7	10,2	10,1
Т.4. Центрифуговщик сменный 4 разряда / P.4. Shift centrifuge operator of grade 4	52,0	7,3	4,6	15,9	20,3
Т.5. Аппаратчик вакуум-насосного отделения / P.5. Vacuum pump department operator	85,9	3,3	1,6	5,2	4,1
Т.6. Машинист мостового крана / P.6. Overhead crane operator	40,9	5,9	4,6	20,9	27,8
Т.7. Аппаратчик сушильного отделения / P.7. Drying department operator	58,1	1,4	0,9	8,8	30,7
Т.8. Аппаратчик приготовления реагентов / P.8. Reagent preparation operator	48,3	6,7	6,7	16,7	21,7
Помещение сравнения / Reference workplace					
Т.1. Специалист отдела пропусков / Permit specialist	4,6	3,5	4,6	20,7	66,7

значимо ниже значения относительного прироста диаметра плечевой артерии (12,7 % против 16,1 %, $p = 0,006$) и коэффициента чувствительности эндотелия к напряжению сдвига (0,08 у.е. против 0,14 у.е., $p = 0,0001$). Патологическая ЭЗВД (посткомпрессионная дилатация плечевой артерии менее 10%) выявлена у 28 человек (29,8 %) в группе наблюдения и у 9 человек (12,9 %) группы сравнения.

Анализ полученных значений показателей сфигмоманометрии обследованных работников не определил достоверных межгрупповых различий ($p = 0,12–0,99$). Однако при этом в группе наблюдения индекс аугментации (AI) был статистически значимо выше, чем в группе сравнения (таблица 4).

Анализ данных ультразвукового исследования брахиоцефальных артерий показал, что статистически значимых различий по абсолютной ТКИМ и доле ее значений, превышающих норму для соответствующего возраста и пола, между группами не выявлено (таблица 5).

Построены парные логистические регрессионные модели, отражающие зависимость «экспозиция-ответ», которые позволили получить оценку вероятности отклонения показателя «Относительный прирост диаметра плечевой артерии» от нормы в зависимости от воздействия пылевого фактора (уровня концентрации). Получены следующие параметры логистических регрессионных моделей:

- PM_1: $b_0 = -1,7673$, $b_1 = 1,6280$, $R^2 = 0,40$, $p < 0,05$;
- $PM_{2,5}$: $b_0 = -1,7467$, $b_1 = 1,4010$, $R^2 = 0,40$, $p < 0,05$;
- PM_4: $b_0 = -1,7361$, $b_1 = 1,2811$, $R^2 = 0,39$, $p < 0,05$;
- PM_{10}: $b_0 = -1,7315$, $b_1 = 0,9881$, $R^2 = 0,39$, $p < 0,05$
- PM_{15}: $b_0 = -1,7456$, $b_1 = 0,8087$, $R^2 = 0,37$, $p < 0,05$.

Полученные зависимости показаны на рисунке.

При повышении концентрации взвешенных веществ мелкодисперсных фракций вероятность нарушения эндотелиальной функции по данным ЭЗВД увеличивается. Коэффициент детерминации (R^2) в логистических моделях составил 0,37–0,4.

Обсуждение. Оценивая запыленность воздуха на рабочем месте аппаратчика флотационного процесса предприятия № 1, следует отметить, что содержание фракции PM_1, $PM_{2,5}$, PM_4, PM_{10} выше относительно рабочего места сравнения в 357, 164, 178, 76 раз соответственно. На рабочем месте фильтровальщика содержание фракции PM_1, $PM_{2,5}$, PM_4, PM_{10}

https://doi.org/10.35627/2219-5238/2024-32-10-36-44
Original Research Article

Таблица 4. **Данные сфигмоманометрии у обследованных работников, Me (25;75)**
Table 4. **Sphygmomanometry results in the examined workers, Me (25;75)**

Показатели сфигмоманометрии / Sphygmomanometry results	Группа наблюдения / Observation group	Группа сравнения / Reference group	*p*
CAVI справа / right CAVI	7 (6,4;7,7)	7 (6,4;7,7)	0,96
CAVI слева / left CAVI	6,9 (6,4;7,7)	7 (6,3;7,6)	0,99
ABI справа / right ABI	1,07(1,03;1,12)	1,08 (1,03;1,13)	0,63
ABI слева / left ABI	1,08 (1,03;1,13)	1,08 (1,04;1,13)	0,90
AI	1,02 (0,91;1,15)	0,96 (0,87;1,06)	0,006

Примечание: значение $p \leq 0,05$ считалось статистически значимым.
Сокращения: CAVI, сердечно-лодыжечный сосудистый индекс; ABI, лодыжечно-плечевой индекс; AI, индекс аугментации.

Note: the *p*-value ≤ 0.05 was judged as statistically significant.
Abbreviations: CAVI, cardio-ankle vascular index; ABI, ankle brachial index; AI, augmentation index.

Таблица 5. **Данные ультразвукового исследования БЦА у обследованных работников, %**
Table 5. **Results of ultrasound of the brachiocephalic arteries in the examined workers, %**

Данные ультразвукового исследования БЦА / BCA ultrasound results	Группа наблюдения / Observation group	Группа сравнения / Reference group	*p*
Значения толщины КИМ / CIMT values, Me (25;75)			
ТКИМ, мм / CIMT, mm	0,60 (0,50;0,70)	0,50 (0,50;0,70)	0,09
Частота выявления изменения БЦА, % / Frequency of detection of BCA changes, %			
- наличие атеросклеротических бляшек / atherosclerotic plaques, *n* (%)	17 (11,9)	11 (14,1)	0,65
- увеличение ТКИМ / increased CIMT, *n* (%)	15 (10,6)	10 (12,8)	0,617

Примечание: значение $p \leq 0,05$ считалось статистически значимым.
Сокращения: CAVI, сердечно-лодыжечный сосудистый индекс; ABI, лодыжечно-плечевой индекс; AI, индекс аугментации.

Note: the p-value ≤ 0.05 was judged as statistically significant.
Abbreviations: BCA, brachiocephalic arteries; CIMT, carotid intima-media thickness.

выше относительно рабочего места сравнения в 230, 105, 116, 53 раз соответственно. На рабочем месте машиниста мельниц содержание фракции PM_1, $PM_{2,5}$, PM_4, PM_{10} выше относительно рабочего места сравнения в 330, 156, 169, 70 раз соответственно.

На рабочем месте аппаратчика измельчения отделения обогащения предприятия № 2 содержание фракций PM_1, $PM_{2,5}$, PM_4, PM_{10} выше относительно рабочего места сравнения в 175, 75, 79, 31 раз соответственно. На рабочем месте аппаратчика сушильного отделения установлено содержание фракции PM_1, $PM_{2,5}$, PM_4, PM_{10} выше относительно рабочего места сравнения в 312, 128, 130, 50 раз соответственно.

Результат анализа по процентному составу частиц на предприятиях по производству минеральных удобрений показал, что наибольшая доля всех частиц, находящихся в воздухе рабочей зоны, относится к PM_1. По данным научной литературы, чем меньше размеры пылевых частиц, тем большую биологическую активность они проявляют [20, 21]. При этом важно учитывать не только дисперсность пылевых частиц, но и их качественный состав, поскольку на состояние сосудов в организме работников, занятых на производстве с вредными условиями труда, большое влияние может оказывать химический состав частиц.

Анализ значений показателей артериальной жесткости работников показал, что доли работников в сравниваемых группах с морфологическими изменениями индексов CAVI, ABI были сопоставимы. В то же время по результатам контурного анализа пульсовой волны (индекс аугментации) в группе наблюдения имелись признаки повышения артериальной жесткости. В литературе имеются противоречивые данные о влиянии взвешенных частиц на жесткость артерий. S.G. Al-Kindi и соавт. приводят данные о статистически значимой корреляции прироста скорости пульсовой волны за 3 года наблюдения у лиц, проживающих в условиях воздействия $PM_{2,5}$ в концентрации выше 12 мг/м^3, в то же время в начале исследования авторы корреляций данных показателей не выявили [22]. L. Zanoli и соавт. выполнили систематический обзор литературы о влиянии краткосрочного и длительного воздействия $PM_{2,5–10}$ на показатели артериальной жесткости. В 6 из 8 исследованиях, включенных в обзор, выявлено повышение скорости пульсовой волны и индекса аугментации при воздействии $PM_{2,5–10}$ [23].

В группе наблюдения было обнаружено наличие эндотелиальной дисфункции у 29,8 % работников, при этом в группе наблюдения в 2,3 раза больше лиц с эндотелиальной дисфункцией, чем в группе сравнения. В настоящее время, в литературе имеется ряд оригинальных статей и систематических обзоров, которые подтверждают повреждающее действие PM на функцию эндотелия. Преимущественно, патогенетический механизм объясняется повреждением клеток эндотелия и последующим нарушением баланса вазодилатирующих и вазоконстрикторных, а также противо- и провоспалительных факторов [24, 25]. Эндотелиальная дисфункция большинством авторов рассматривается как начальный этап атерогенеза [14]. В настоящем исследовании не

https://doi.org/10.35627/2219-5238/2024-32-10-36-44
Оригинальная исследовательская статья

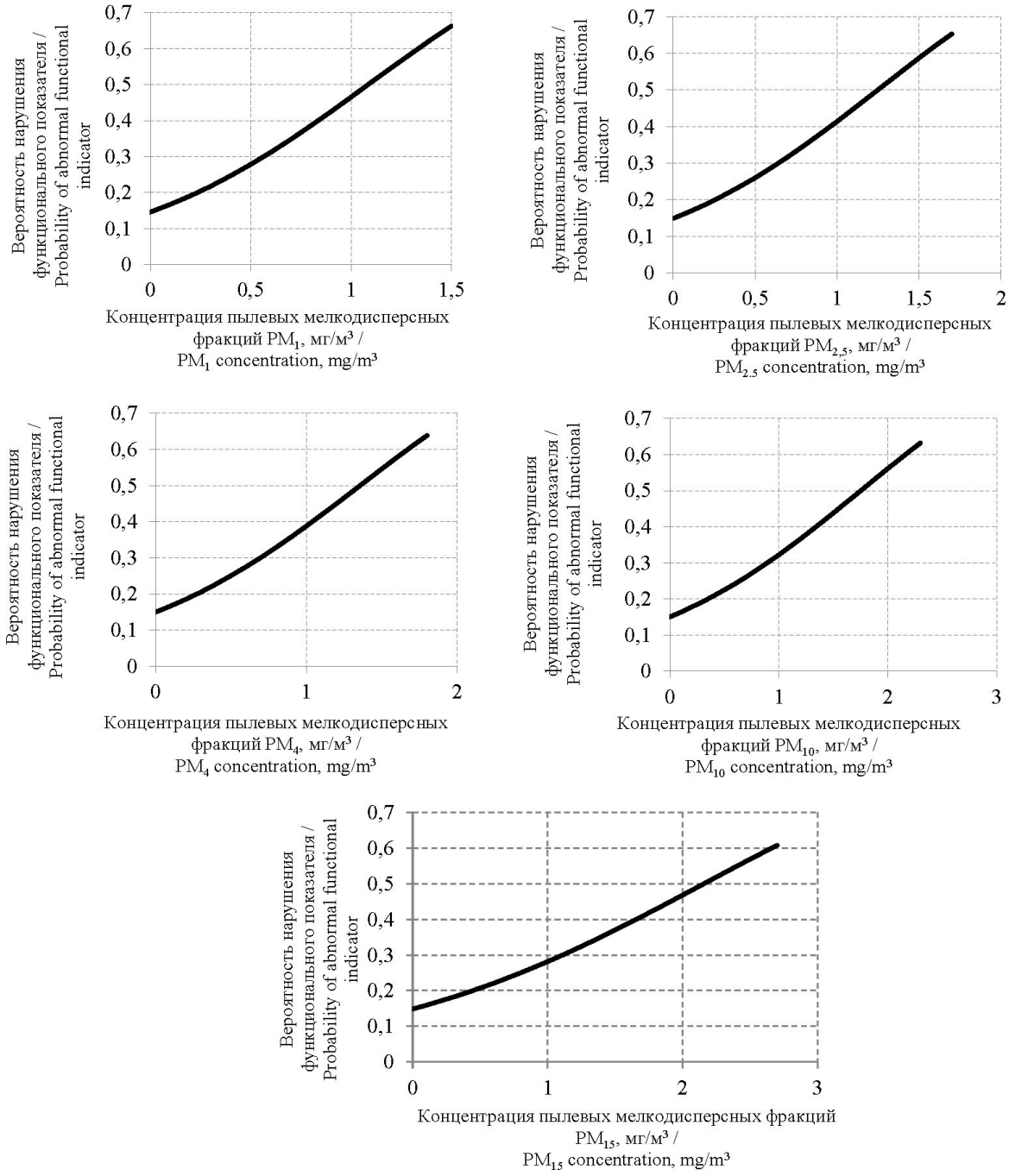

Рисунок. Зависимость вероятности отклонения показателя «Относительный прирост диаметра плечевой артерии» от нормы при воздействии пылевого фактора

Figure. The relationship between exposure to particulate matter and the probability of abnormal relative increase in the brachial artery diameter

выявлено статистически значимых различий по частоте выявления атеросклеротических бляшек в брахиоцефальных артериях. В то же время значение медианы толщины КИМ в группе наблюдения имело тенденцию к увеличению относительно группы сравнения. По данным других исследований, длительное воздействие высоких концентраций мелкодисперсных частиц приводит к увеличению ТКИМ [26, 27].

Таким образом, в настоящем исследовании продемонстрировано нарушение функции эндотелия у работников, подвергающихся воздействию взвешенных мелкодисперсных частиц в воздухе рабочей зоны. Выполнено математическое моделирование зависимости эндотелиальной дисфункции от концентрации PM в воздухе с определением вклада PM в ее формирование. Структурные изменения артерий были менее показательными, но в группе наблюдения установлено повышение индекса аугментации, что свидетельствует о повышении артериальной жесткости, и тенденция к увеличению ТКИМ.

Выводы

1. При повышении концентрации взвешенных веществ мелкодисперсных фракций пыли повышается

https://doi.org/10.35627/2219-5238/2024-32-10-36-44
Original Research Article

вероятность развития нарушения эндотелиальной функции, а также повышается артериальная жесткость по данным контурного анализа пульсовой волны.

2. Вклад мелкодисперсных фракций пыли в развитие эндотелиальной дисфункции составляет 37–40 %.

3. На рабочих местах с высоким содержанием PM необходимо снижение концентрации мелкодисперсных фракций пыли в воздухе рабочей зоны до гигиенических нормативов, что позволит внести значимый вклад в профилактику сердечно-сосудистой патологии у работников.

4. Расширение количества обследуемых работников, увеличение времени исследования и оценка дополнительных факторов, способствующих развитию атеросклероза, а также более детальное изучение респирабельных фракций мелкодисперсных частиц воздуха рабочей зоны может стать направлением для дальнейших исследований по оценке влияния аэрогенного воздействия мелкодисперсных частиц воздуха рабочей зоны на состояние артерий работников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Cheriyan D, Hyun KY, Jaegoo H, Choi JH. Assessing the distributional characteristics of PM_{10}, $PM_{2.5}$, and PM_1 exposure profile produced and propagated from a construction activity. *J Clean Prod.* 2020;276:124335. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124335
2. Li Y, Yang M, Men T, *et al*. Oxidative stress induced by ultrafine carbon black particles can elicit apoptosis in vivo and vitro. *Sci Total Environ.* 2020;709:135802. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135802
3. Fatima S, Mishra SK, Kumar U, Ahlawat A, Dabodiya TS, Kholsa D. Role of morphology and chemical composition of PM for particle deposition in human respiratory system: A case study over megacity-Delhi. *Urban Clim.* 2023;47:101344. doi: 10.2139/ssrn.4161388
4. Егорова А.М., Луценко Л.А., Федорович Г.В., Сухова А.В. Совершенствование гигиенических критериев оценки риска здоровью работников пылевых профессий // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 10. С. 33–37. Egorova AM, Lutsenko LA, Fedorovich GV, Sukhova AV. Improvement of hygiene criteria for assessing the health risk of workers in dust professions. *Mezhdunarodnyy Zhurnal Prikladnykh i Fundamental'nykh Issledovaniy.* 2020;(10):33-37. (In Russ.) doi: 10.17513/mjpfi.13135
5. Pędzik M, Rogoziński T, Majka J, *et al.* Fine dust creation during hardwood machine sanding. *Appl Sci.* 2021;11(14):6602. doi: 10.3390/app11146602
6. Liu T, Jiang Y, Hu J, *et al*. Association of ambient PM1 with hospital admission and recurrence of stroke in China. *Sci Total Environ.* 2022;828:154131. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154131
7. Ma X, Duan H, Zhang H, *et al.* Short-term effects of PM_1, $PM_{2.5}$, and $PM_{2.5}$ constituents on myocardial infarction mortality in Qingdao, China: A time-stratified case-crossover analysis. *Atmos Environ*. 2023;294:119478. doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119478
8. Xu R, Wei J, Liu T, *et al.* Association of short-term exposure to ambient PM_1 with total and cause-specific cardiovascular disease mortality. *Environ Int*. 2022;169:107519. doi: 10.1016/j.envint.2022.107519
9. Yang BY, Guo Y, Morawska L, *et al*. Ambient PM_1 air pollution and cardiovascular disease prevalence: Insights from the 33 Communities Chinese Health Study. *Environ Int.* 2019;123:310–317. doi: 10.1016/j.envint.2018.12.012
10. Li N, Chen G, Liu F, *et al*. Associations of long-term exposure to ambient PM_1 with hypertension and blood pressure in rural Chinese population: The Henan rural cohort study. *Environ Int.* 2019;128:95–102. doi: 10.1016/j.envint.2019.04.037
11. Orona NS, Astort F, Maglione GA, Yakisich JS, Tasat DR. Direct and indirect effect of air particles exposure induce Nrf2-dependent cardiomyocyte cellular response in vitro. *Cardiovasc Toxicol.* 2019;19(6):575–587. doi: 10.1007/s12012-019-09530-z
12. Ljungman PLS, Andersson N, Stockfelt L, *et al.* Long-term exposure to particulate air pollution, black carbon, and their source components in relation to ischemic heart disease and stroke. *Environ Health Perspect*. 2019;127(10):107012. doi: 10.1289/ehp4757
13. Al-Kindi SG, Brook RD, Biswal S, Rajagopalan S. Environmental determinants of cardiovascular disease: Lessons learned from air pollution. *Nat Rev Cardiol.* 2020;17(10):656–672. doi: 10.1038/s41569-020-0371-2
14. Liang S, Zhang J, Ning R, *et al.* The critical role of endothelial function in fine particulate matter-induced atherosclerosis. *Part Fibre Toxicol*. 2020;17(1):61. doi: 10.1186/s12989-020-00391-x
15. Hu T, Zhu P, Liu Y, *et al.* $PM_{2.5}$ induces endothelial dysfunction via activating NLRP3 inflammasome. *Environ Toxicol.* 2021;36(9):1886–1893. doi: 10.1002/tox.23309
16. Tian G, Wang J, Lu Z, *et al*. Indirect effect of PM_1 on endothelial cells via inducing the release of respiratory inflammatory cytokines. *Toxicol In Vitro.* 2019;57:203–210. doi: 10.1016/j.tiv.2019.03.013
17. Sharma K, Lee HH, Gong DS, *et al*. Fine air pollution particles induce endothelial senescence via redox-sensitive activation of local angiotensin system. *Environ Pollut.* 2019;252(Pt A):317-329. doi: 10.1016/j.envpol.2019.05.066
18. Celermajer DS, Sorensen KE, Gooch VM, *et al*. Non-invasive detection of endothelial dysfunction in children and adults at risk of atherosclerosis. *Lancet*. 1992;340(8828):1111-1115. doi: 10.1016/0140-6736(92)93147-f
19. Stein JH, Korcarz CE, Hurst RT, *et al.* Use of carotid ultrasound to identify subclinical vascular disease and evaluate cardiovascular disease risk: A consensus statement from the American Society of Echocardiography Carotid Intima-Media Thickness Task Force. Endorsed by the Society for Vascular Medicine. *J Am Soc Echocardiogr*. 2008;21(2):93-111. doi: 10.1016/j.echo.2007.11.011
20. Yang M, Guo YM, Bloom MS, *et al.* Is PM_1 similar to $PM_{2.5}$? A new insight into the association of PM_1 and $PM_{2.5}$ with children's lung function. *Environ Int.* 2020;145:106092. doi: 10.1016/j.envint.2020.106092
21. Kwon HS, Ryu MH, Carlsten C. Ultrafine particles: Unique physicochemical properties relevant to health and disease. *Exp Mol Med.* 2020;52(3):318–328. doi: 10.1038/s12276-020-0405-1
22. Al-Kindi SG, Brook RD, Dobre M, Rahman M, Wright JT, Rajagopalan S. Ambient air pollution and pulse wave velocity in patients with hypertension treated with intensive versus standard blood pressure control. *Hypertension.* 2022;79(12):e144-e146. doi: 10.1161/HYPERTENSIONAHA.122.19779
23. Zanoli L, Lentini P, Granata A, *et al*. A systematic review of arterial stiffness, wave reflection and air pollution. *Mol Med Rep.* 2017;15(5):3425-3429. doi: 10.3892/mmr.2017.6392
24. Riggs DW, Zafar N, Krishnasamy S, *et al*. Exposure to airborne fine particulate matter is associated with impaired endothelial function and biomarkers of oxidative stress and inflammation. *Environ Res*. 2020;180:108890. doi: 10.1016/j.envres.2019.108890

https://doi.org/10.35627/2219-5238/2024-32-10-36-44
Оригинальная исследовательская статья

25. Xia B, Zhou Y, Zhu Q, *et al*. Personal exposure to $PM_{2.5}$ constituents associated with gestational blood pressure and endothelial dysfunction. *Environ Pollut.* 2019;250:346–356. doi: 10.1016/j.envpol.2019.04.024
26. Wilker EH, Mittleman MA, Coull BA, *et al*. Long-term exposure to black carbon and carotid intima-media thickness: The normative aging study. *Environ Health Perspect.* 2013;121(9):1061–1067. doi: 10.1289/ehp.1104845
27. Peralta AA, Schwartz J, Gold DR, Vonk JM, Vermeulen R, Gehring U. Quantile regression to examine the association of air pollution with subclinical atherosclerosis in an adolescent population. *Environ Int*. 2022;164:107285. doi: 10.1016/j.envint.2022.107285

Сведения об авторах:
Носов Александр Евгеньевич – к.м.н., заведующий отделением лучевой и функциональной диагностики; e-mail: nosov@fcrisk.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0539-569X.
Байдина Анастасия Сергеевна – к.м.н., врач-кардиолог консультативно-поликлинического отделения; e-mail: anastasia_baidina@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3131-5868.
✉ **Зорина** Анастасия Сергеевна – к.б.н., заведующий лабораторией методов анализа наноматериалов и мелкодисперсных частиц; e-mail: zorina@fcrisk.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4276-9921.
Сухих Екатерина Александровна – младший научный сотрудник лаборатории методов анализа наноматериалов и мелкодисперсных частиц; e-mail: suhih@fcrisk.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3787-6746.
Крылов Алексей Александрович – младший научный сотрудник лаборатории методов анализа наноматериалов и мелкодисперсных частиц; e-mail: Krylov@fcrisk.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8931-0539.
Чигвинцев Владимир Михайлович – научный сотрудник отдела математического моделирования систем и процессов; e-mail: cvm@fcrisk.ru; ORCID: https://orcid.org/0000–0002–0345–3895.

Информация о вкладе авторов: концепция, актуальность, исследовательская часть, подготовка рукописи: *Носов А.Е.*, *Байдина А.С.*, *Зорина А.С.*; аналитическая и исследовательская часть: *Байдина А.С.*, *Крылов А.А.*, *Сухих Е.А.;* построение математической модели: *Чигвинцев В.М.* Все авторы ознакомились с результатами работы и одобрили окончательный вариант рукописи.
Соблюдение этических стандартов: протокол исследования одобрен комитетом по этике Федерального бюджетного учреждения науки «Федерального научного центра медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, протокол заседания № 2 от 13.02.2020. Все работники дали добровольное информированное согласие на участие в исследовании.
Финансирование: исследование проведено без спонсорской поддержки.
Конфликт интересов: авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Статья получена: 15.01.24 / Принята к публикации: 10.10.24 / Опубликована: 31.10.24

Author information:
Alexander E. **Nosov**, Cand. Sci. (Med.), Head of the Department of Radiation and Functional Diagnostics; e-mail: nosov@fcrisk.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0539-569X.
Anastasia S. **Baidina**, Cand. Sci. (Med.), cardiologist, Outpatient Department; e-mail: anastasia_baidina@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3131-5868.
✉ Anastasiya S. **Zorina**, Cand. Sci. (Biol.), Head of the Nanomaterial and Fine Particle Testing Laboratory; e-mail: zorina@fcrisk.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4276-9921.
Ekaterina A. **Sukhikh**, Junior Researcher, Nanomaterial and Fine Particle Testing Laboratory; e-mail: suhih@fcrisk.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3787-6746.
Alexey A. **Krylov**, Junior Researcher, Nanomaterial and Fine Particle Testing Laboratory; e-mail: Krylov@fcrisk.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8931-0539.
Vladimir M. **Chigvintsev**, Researcher, Department of Mathematical Modeling of Systems and Processes; e-mail: cvm@fcrisk.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0345-3895.

Author contributions: study conception and design, relevance, research part, draft manuscript preparation: *Nosov A.E.*, *Baidina A.S.*, *Zorina A.S.*; research part and analysis: *Baidina A.S.*, *Krylov A.A.*, *Sukhikh E.A.*; construction of a mathematical model: *Chigvintsev V.M.* All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.
Compliance with ethical standards: The study protocol was approved by the Ethics Committee of the Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risks Management Technologies (protocol No. 2 of February 13, 2020). All workers gave written informed consent to participate in the study.
Funding: This research received no external funding.
Conflict of interest: The authors have no conflicts of interest to declare.

Received: January 15, 2024 / Accepted: October 10, 2024 / Published: October 31, 2024