

Читать  
онлайн  
Read  
online

Шеломенцев И.Г., Гомзикова Е.А.

## Перспективы анализа наночастиц в составе аэрозоля методом электронной микроскопии

ФБУН «Екатеринбургский медицинский-научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий»  
Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 620014, Екатеринбург, Россия

**Введение.** Нормирование дисперсности аэрозолей воздуха рабочей зоны является одной из важных проблем гигиены. Для оценки влияния частиц аэрозоля на здоровье рабочих необходимо совершенствование существующих и внедрение новых методик анализа дисперсности и химического состава аэрозоля, в том числе его нанодисперсии.

**Материалы и методы.** Наночастицы оксида свинца со средним диаметром  $26,2 \pm 12,6$  нм, полученные с использованием генератора наночастиц, были отобраны на нейлоновые мембранные фильтры диаметром 47 мм с размером пор 0,2 и 1,2 мкм. Экспериментальная установка представляла собой систему каскада из двух мембранных фильтров: первый уровень фильтрации — для отбора наночастиц, второй уровень — для оценки эффективности улавливания наночастиц первым уровнем. В системах каскадов время отбора проб составило 5; 10; 15; 20; 40 и 80 мин на фильтрах с размером пор 0,2 мкм, а на фильтрах с размером пор 1,2 мкм — 5; 10; 20 и 120 мин. Во всех случаях объемная скорость потока воздуха составила 1,5 л/мин. Анализ поверхности мембран проводили с использованием метода сканирующей электронной микроскопии.

**Результаты.** Наночастицы оксида свинца были обнаружены на поверхности всех испытанных фильтров, располагались равномерно по всей рабочей площади, а в зависимости от длительности отбора проб аэрозоля нагрузка поверхности фильтров увеличивалась, как и заметно увеличивалось количество агрегатов. На поверхности фильтров 2-го уровня, вне зависимости от длительности отбора, наночастицы обнаружены не были.

**Ограничения исследования.** Результаты нельзя распространять на все виды наночастиц, так как свойства полиамидных (нейлоновых) фильтров изучались только относительно наночастиц оксида свинца.

**Заключение.** В данном исследовании было показано, что полиамидные (нейлоновые) фильтры с порами 0,2 и 1,2 мкм имеют высокий потенциал улавливания наночастиц и могут быть рассмотрены в качестве инструмента для разработки новых методов исследования и контроля вредных факторов.

**Ключевые слова:** полиамидные фильтры; нейлоновые фильтры; мембранные фильтры; дисперсность; наночастицы; сканирующая электронная микроскопия

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

**Для цитирования:** Шеломенцев И.Г., Гомзикова Е.А. Перспективы анализа наночастиц в составе аэрозоля методом электронной микроскопии. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(3): 259-264. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-3-259-264> <https://elibrary.ru/eaicdo>

**Для корреспонденции:** Шеломенцев Иван Глебович, науч. сотр. ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора, Екатеринбург. E-mail: shelomencev@ymrc.ru

**Участие авторов:** Шеломенцев И.Г. — концепция и дизайн исследования, сбор данных, анализ и интерпретация результатов, написание текста; Гомзикова Е.А. — сбор данных, анализ и интерпретация результатов, литературный обзор, написание текста. *Все соавторы* — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

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

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 16.01.2023 / Принята к печати: 24.03.2023 / Опубликована: 20.04.2023

Ivan G. Shelomentsev, Ekaterina A. Gomzikova

## Prospects of analyzing of nanoparticles in the composition of aerosol by the method of electron microscopy

Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation

**Introduction.** Control of distribution of aerosol particle by size in the workplace area is one of the important problems of hygiene. To assess health effect of aerosol particles in workers, it is necessary to improve existing and introduce new methods for analyzing the dispersion and chemical composition of aerosols, including their nanosized constituents.

**Materials and methods.** Generated lead oxide nanoparticles with an average diameter of  $26.2 \pm 12.6$  nm were sampled on 47-mm nylon membrane disc filters with a pore size of 0.2  $\mu\text{m}$  and 1.2  $\mu\text{m}$ . The experimental device represented a cascade system consisting of two membrane filters, where the first filter was intended for capturing nanoparticles while the second one was used for establishing the capture efficiency of the first. The sampling time for the cascade systems was 5, 10, 15, 20, 40, and 80 minutes for filters with a pore size of 0.2  $\mu\text{m}$  and 5, 10, 20, and 120 minutes for those with a 1.2  $\mu\text{m}$  pore size; in all cases, the volumetric flow rate was 1.5 L/min. The membrane surface was then analyzed by scanning electron microscopy.

**Results.** Lead oxide nanoparticles were found on all filters tested. They were evenly distributed over the entire effective filter area, their number increasing with air sampling duration. No nanoparticles were observed on the second level filters, regardless of the sampling period.

**Limitations.** The results cannot be extrapolated to all types of nanoparticles since the capacity of polyamide/nylon filters was studied only with respect to lead oxide nanoparticles.

**Conclusion.** The study proved that polyamide/nylon filters with the pore sizes of 0.2  $\mu\text{m}$  and 1.2  $\mu\text{m}$  have a high potential for nanoparticle capture and can be considered as a tool for developing new techniques of studying and controlling harmful factors.

**Keywords:** polyamide filters; nylon filters; membrane filters; particle size distribution; nanoparticles; scanning electron microscopy

**Compliance with ethical standards.** Ethics approval was not required for this study.

**For citation:** Shelomentsev I.G., Gomzikova E.A. Prospects of analyzing of nanoparticles in the composition of aerosol by the method of electron microscopy. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(3): 259-264. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-3-259-264> <https://elibrary.ru/eaicdo> (In Russian)

**For correspondence:** Ivan G. Shelomentsev, MD, Researcher, Department of Molecular Biology and Electron Microscopy, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation. E-mail: shelomencev@ymrc.ru

**Information about the authors:**

Shelomentsev I.G., <https://orcid.org/0000-0002-8795-8777> Gomzikova E.A., <https://orcid.org/0000-0001-6641-401X>

**Contribution:** Shelomentsev I.G. – study conception and design, data collection, analysis and interpretation of results, writing text; Gomzikova E.A. – literature review, data collection, analysis and interpretation of results, writing text. *All co-authors* – approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

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

**Acknowledgement.** The study had no sponsorship.

Received: January 16, 2023 / Accepted: March 24, 2023 / Published: April 20, 2023

## Введение

Определение дисперсности аэрозоля в воздухе рабочей зоны является важным направлением научных гигиенических исследований [1–3]. Отсутствие нормирования дисперсности аэрозоля является одной из проблем в существующей системе оценки и прогнозирования эффектов экспозиции на здоровье рабочих и населения. Известно, что промышленный аэрозоль в зависимости от сырья, типа и этапа технологического процесса может преимущественно состоять из мелко-, высоко- и ультрадисперсной фракций<sup>1</sup> [4]. Вместе с тем известно, что наночастицы (НЧ), находящиеся в аэрозолях, могут оказывать токсическое действие на организм, причём более выраженное, чем микрометровые частицы [5–7]. Таким образом, существующая система даёт возможность в полной мере оценить лишь массовые концентрации аэрозоля, но не реализуемые им эффекты. Необходимо внедрение новых и модернизация существующих методов определения дисперсности и химического состава аэрозолей, в том числе НЧ<sup>2,3,4</sup>.

Существует множество путей определения НЧ в составе аэрозоля: гравиметрический метод, экспресс-методы с использованием газоанализаторов, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, диффузионная аэрозольная спектрометрия, выщелачивание. Электронная микроскопия (ЭМ) позволяет наиболее ёмко получить необходимую информацию о составе аэрозоля. Данный метод имеет как недостатки (например, соблюдение ряда требований при подготовке образцов), так и объективные преимущества: получение изображений наночастиц вплоть до 10 нм за счёт большей разрешающей способности и глубины резкости, трёхмерное представление получаемых изображений, возможность подключения дополнительных приборов для анализа. Помимо исследования физических характеристик (размера и формы частиц) ЭМ в тандеме с методами спектроскопии, к которым относятся энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДРС), дифракция отражённых электронов (ДОЭ), рентгеновская флуоресцентная спектрометрия (общепринятое обозначение – РФА, РФС) и др., позволяет идентифицировать элементный состав НЧ [8–10].

Одним из наиболее распространённых способов отбора проб аэрозоля является фильтрация через мембранные фильтры [11, 12]. Существует большое разнообразие мембран по химическому составу, структуре, размерам и свойствам (рис. 1).

В Российской Федерации для анализа химического состава аэрозоля применяются фильтры АФА-ХА, а для определения запылённости воздуха – фильтры АФА-ВП. Однако для исследований методами ЭМ они не всегда подходят, так как являются микроволокнистыми: частицы могут задерживаться внутри рыхлого слоя ультратонких волокон, располагаясь, таким образом, на разных уровнях, что затрудняет анализ. Также при исследовании поверхности фильтра волокна могут раскачиваться под воздействием пучка, что усложняет анализ в высоком разрешении. Волокнистую структуру имеют и фильтры, изготовленные, например, из ацетата целлюлозы, полипропилена или стекловолокна.

Особенностью метода ЭМ является воздействие на образец электронным пучком. В месте контакта сфокусированного пучка с образцом происходит локальный нагрев, поэтому мембраны из фторопласта, нитрата целлюлозы и ряда других материалов плавятся и деформируются, затрудняя анализ НЧ при больших увеличениях.

Для элементного анализа частиц с помощью ЭДРС также необходимо подбирать фильтры исходя из их состава. Например, наличие серы в полиэфирсульфоновых (PES) мембранах, фтора в поливинилиденфторидных (PVDF) и других фторсодержащих полимерных мембранах может отразиться в появлении посторонних спектров на спектрограмме, тем самым затрудняя определение состава самих анализируемых частиц и ограничивая возможности метода. Необходимо рассмотреть и такой важный аспект, как удобство в эксплуатации. Распространённые в исследованиях аэрозолей трековые мембранные фильтры имеют небольшую толщину и в сочетании с высоким статическим зарядом на поверхности становятся сложными в обращении. К тому же они обладают высоким сопротивлением потоку и низкими значениями скорости фильтрации, что накладывает дополнительные эксплуатационные ограничения.

Соответствие необходимым критериям и отсутствие перечисленных выше недостатков делают NY-фильтры перспективными при использовании в анализе НЧ методом ЭМ. Они имеют относительно ровную поверхность (следовательно, частицы располагаются на одном уровне), устойчивы к воздействию электронного пучка, в своём элементном составе содержат только углерод, азот и кислород (не считая возможных примесей), а также прочны и удобны в эксплуатации. Недостатком же является их низкая светостойкость, что требует осторожности на этапе отбора проб.

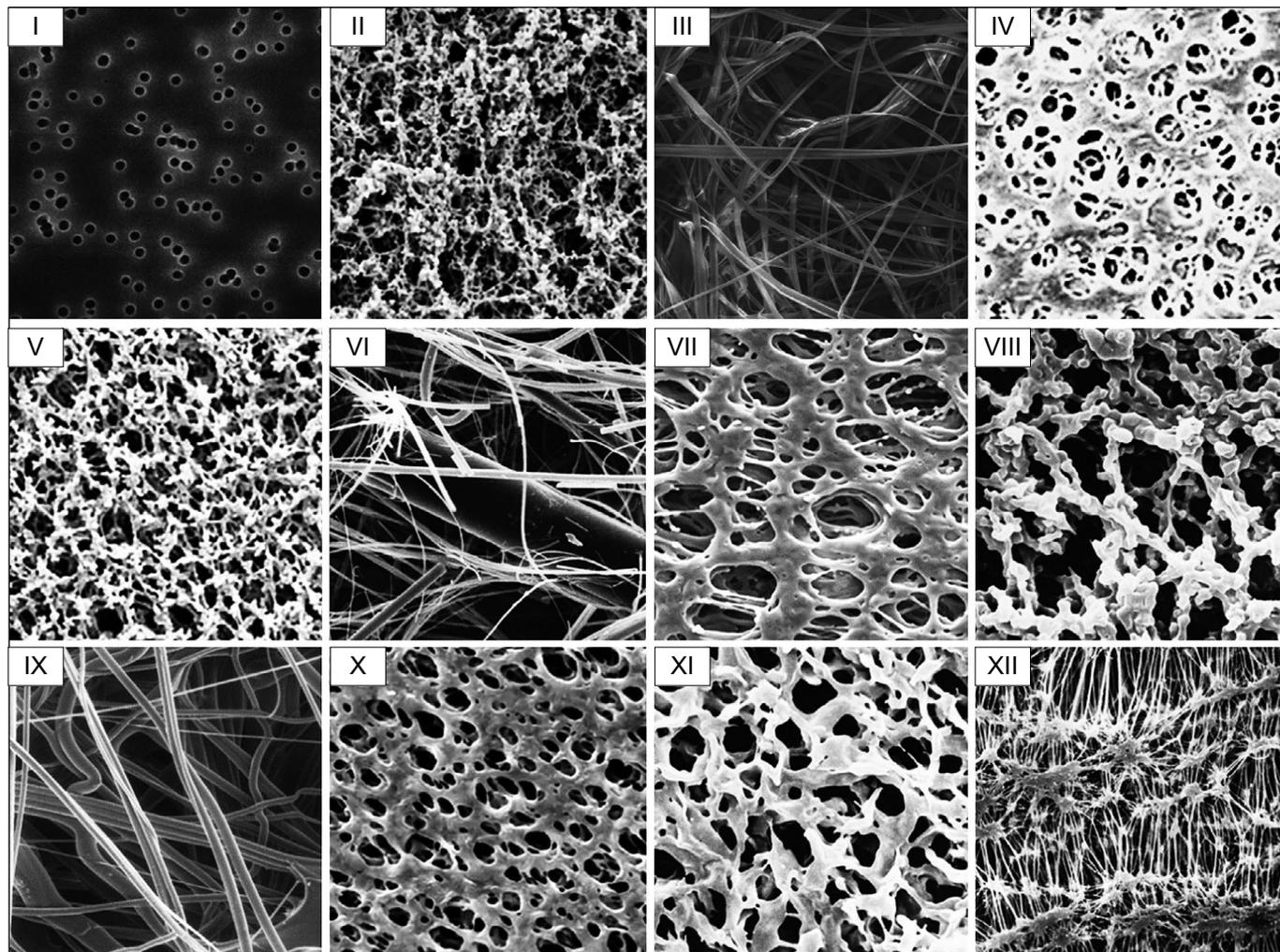
Основной областью применения NY-фильтров остаётся очистка воды и органических растворителей, удаление частиц из водных растворов для аналитических исследований, а также стерильная фильтрация жидкостей [13–15]. Ранее проводились исследования оценки эффективности сорбции НЧ данным видом фильтров, когда суспензии наночастиц золота размерами 5; 10 и 20 нм пропускали через мембраны различных составов. Для всех испытываемых видов фильтров эффективность удержания составила более 97% (PVDF, PES, PP, PTFE, PC, NY, а также мембраны из высокомолекулярного полиэтилена). Но в сравнении с фильтрами из других материалов полиамидные фильтры с диаметром пор 0,1 мкм показали более высокие значения адсорбции из-за высокого электростатического притяжения частиц. Эффективность удаления частиц с поверхности

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Федеральный закон Российской Федерации от 30 марта 1999 г. № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения».

<sup>3</sup> Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 31 октября 2007 г. № 79 «Об утверждении Концепции токсикологических исследований, методологии оценки риска, методов идентификации и количественного определения наноматериалов».

<sup>4</sup> Федеральный закон от 30.12.2020 г. № 492-ФЗ «О биологической безопасности в Российской Федерации».



**Рис. 1.** Электронные микрофотографии поверхности распространённых типов мембранных фильтров [13–15]: I – поликарбонатные (PC); II – ацетат целлюлозы (CA); III – АФА; IV – регенерированная целлюлоза (RC); V – нитрат целлюлозы (CN); VI – стекловолоконные фильтры; VII – полиэфирсульфон (PES); VIII – смешанные эфиры целлюлозы (MCE); IX – полипропилен (PP); X – полиамид (нейлон) (PA/NY); XI – поливинилиденфторид (PVDF); XII – фторопласт (PTFE).

**Fig. 1.** Electron micrographs of the surface of the common types of membrane filters [13–15]: I – polycarbonate (PC); II – cellulose acetate (CA); III – analytical aerosol filters (AFA); IV – regenerated cellulose (RC); V – cellulose nitrate (CN); VI – glass fiber; VII – polyethersulfone (PES); VIII – mixed cellulose ethers (MCE); IX – polypropylene (PP); X – polyamide/nylon (PA/NY); XI – polyvinylidene fluoride (PVDF); XII – polytetrafluoroethylene (PTFE).

мембраны после фильтрации составила 40–45% (для других материалов – около 90%). Авторы отмечают, что удаление частиц не коррелирует с размером пор фильтров, а связано именно со свойствами материалов, из которых данные фильтры изготовлены. Нейлоновые мембраны обладают высокой эффективностью удерживания, не пропуская в отличие от остальных видов испытанных фильтров частицы при скоростях потока 0,94–10 мл/мин. Однако в испытаниях с НЧ ZnS диаметром 1,7 нм эффективность удерживания снизилась для всех видов фильтров [16].

*Цель исследования* – оценка потенциала применения мембранных NY-фильтров для улавливания находящихся в воздухе НЧ и последующего их анализа методом электронной микроскопии.

## Материалы и методы

*Экспериментальная установка.* НЧ PbO в воздухе получали методом конденсации аэрозоля, образующегося при искровой абляции электродов из свинца чистоты 99,9%, в атмосфере азота с использованием генератора НЧ DNP 3000 (PALAS, Германия). Перед подачей в камеру аэрозоля

смешивали с потоком очищенного увлажнённого воздуха (4 л азота + 16 л воздуха). Влажность поддерживали на уровне 30%, а средняя температура воздуха составила 27 °С. Конечная концентрация НЧ PbO была равна 0,2 мг/м<sup>3</sup>. В качестве фильтродержателя применяли аллонж собственного производства с проставкой 10 мм между фильтрами. Для отбора проб использовали персональный аспиратор AirChek TOUCH Pump (SKC inc., США). Частицы, собранные на поликарбонатные фильтры с размером пор 50 нм и проанализированные сканирующим электронным микроскопом, имели средний диаметр  $26,2 \pm 12,6$  нм, сферическую форму и были одиночными либо образовывали небольшие агрегаты.

*Схема эксперимента.* Для эксперимента использовали дисковые мембранные NY-фильтры фирмы Sartorius (Sartorius AG, Германия) диаметром 47 мм с номинальным размером пор 0,2 и 1,2 мкм. Первый уровень фильтрации в каскаде фильтров применялся для отбора наночастиц, второй уровень – для оценки эффективности улавливания наночастиц первым уровнем. Пробы аэрозоля отбирали трижды при объёмной скорости потока воздуха 1,5 л/мин согласно таблице.

### Схема отбора проб Sampling scheme

№	Длительность отбора, мин Sampling time, min	Уровень фильтрации Filtration level	
		1-й / 1 <sup>st</sup>	2-й / 2 <sup>nd</sup>
1	5		
2	10	Нейлон, поры 0.2 мкм Nylon, 0.2 µm pore size	
3	20		
4	40		
5	80		Нейлон, поры 0.2 мкм Nylon, 0.2 µm pores
6	5		
7	10	Нейлон, поры 1.2 мкм Nylon, 1.2 µm pores	
8	20		
9	120		

**Пробоподготовка и анализ поверхности фильтров.** Фильтры приклеивали к поверхности столика при помощи двухстороннего токопроводящего углеродного скотча. Далее наносили токопроводящий слой углерода толщиной 2,5 нм при помощи вакуумной системы напыления Leica ACE600 (Leica, Австрия). Для визуализации поверхности фильтров использовался сканирующий электронный микроскоп Hitachi REGULUS SU8220 с пятисекционным детектором обратно отражённых электронов (Hitachi, Япония).

Осмотр поверхности фильтров 1-го уровня проводили произвольно в диапазоне увеличений от  $\times 5000$  до  $\times 30\,000$  для подтверждения наличия НЧ. Для анализа фильтров 2-го уровня предварительно перед пробоподготовкой к столикам приклеивали полоски нейлонового фильтра размером  $10 \times 5$  мм (поры 0,2 мкм) с нанесёнными на него НЧ PbO. По НЧ PbO, находящимся на поверхности фильтра, производили настройку контраста и яркости электронного микроскопа перед анализом фильтра 2-го уровня каскада. Первичный осмотр поверхности проводили при увеличении  $\times 5000$ . Далее поэтапно производили анализ при увеличениях  $\times 15\,000$  и  $\times 30\,000$  по 40 и 80 полей зрения соответственно, равномерно разнесённых по площади фильтра.

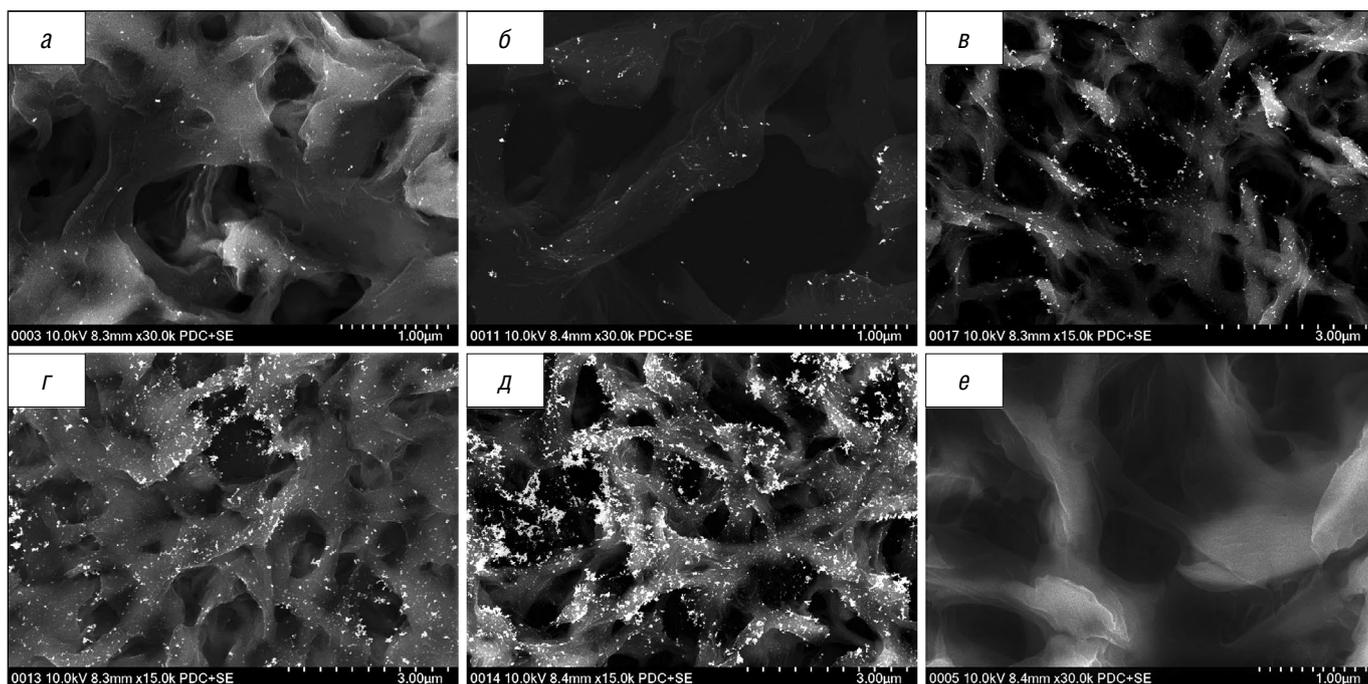
### Результаты

На поверхности всех NY-фильтров 1-го уровня фильтрации с размером пор 0,2 мкм независимо от длительности отбора были обнаружены НЧ PbO (рис. 2).

В зависимости от длительности отбора проб аэрозоля загрузка поверхности фильтров увеличивалась (см. рис. 2, а – д). Вместе с тем заметно увеличивалось и количество агрегатов. Необходимо отметить, что НЧ располагались равномерно по всей рабочей площади фильтра. На поверхности фильтров 2-го уровня, вне зависимости от длительности отбора (5; 10; 20; 40 и 80 мин), НЧ обнаружены не были.

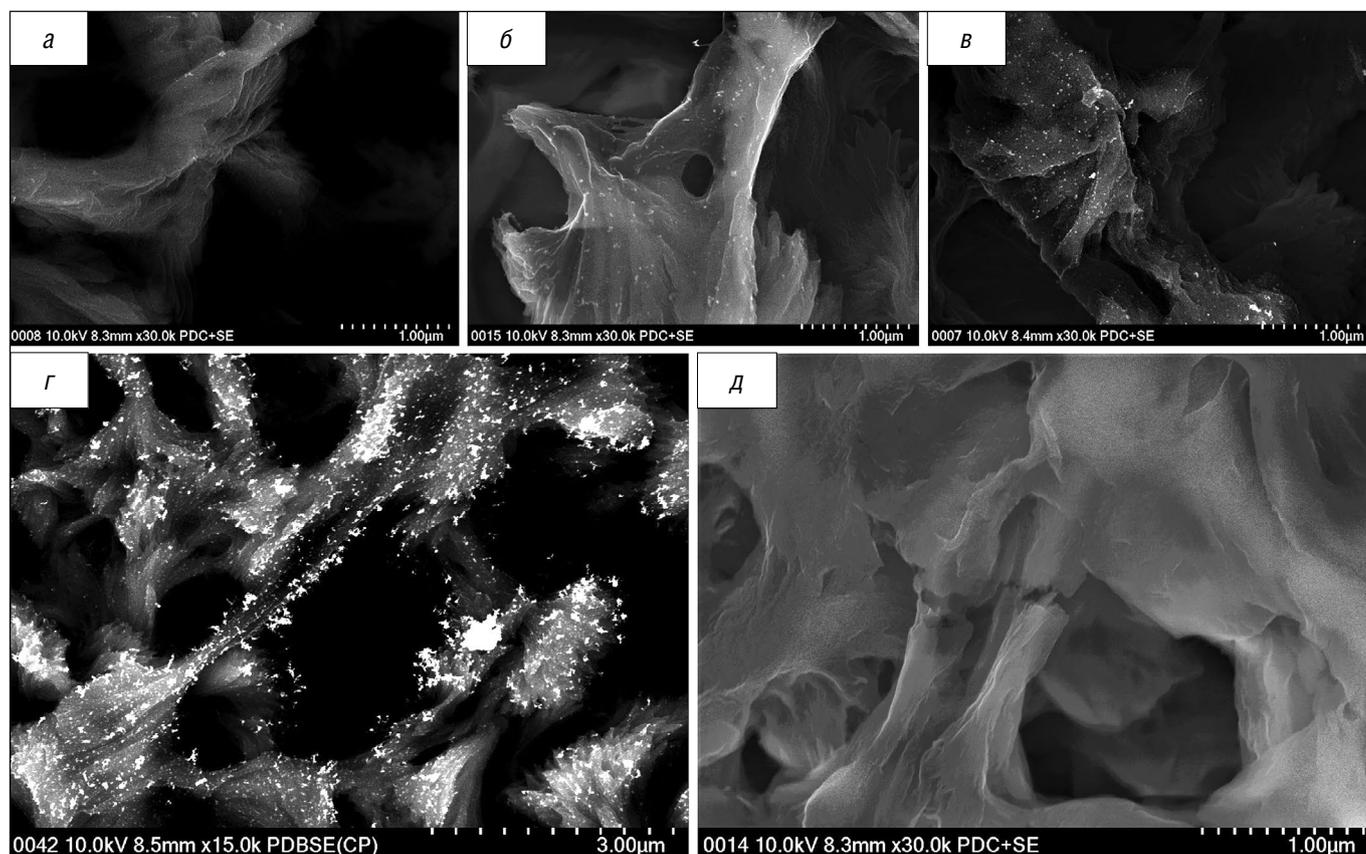
Для NY-фильтров с размером пор 1,2 мкм картина аналогична. На поверхности всех фильтров 1-го уровня фильтрации вне зависимости от длительности отбора были обнаружены НЧ PbO (рис. 3).

Как и в случае с NY-фильтрами с размером пор 0,2 мкм, загрузка поверхности и количество агрегатов возросли с увеличением времени отбора аэрозоля (см. рис. 3, а – е). При увеличении размеров пор фильтров НЧ были равномерно



**Рис. 2.** Репрезентативные электронные микрофотографии поверхности NY-фильтров 0,2 мкм в режиме наложения сигналов (SE + BSE) в зависимости от длительности отбора аэрозоля, 1-й уровень фильтрации каскада, в течение: а – 5 мин; б – 10 мин; в – 20 мин; г – 40 мин; д – 80 мин; е – 2-й уровень фильтрации каскада.

**Fig. 2.** Representative electron micrographs of the surface of nylon filters with a 0.2 µm pores in the signal superposition mode (SE + BSE) depending on aerosol sampling duration at cascade filtration level 1: а – 5 min; б – 10 min; в – 20 min; г – 40 min; д – 80 min; е – at cascade filtration level 2.



**Рис. 3.** Репрезентативные электронные микрофотографии поверхности нейлоновых фильтров в режиме наложения сигналов (SE + BSE) в зависимости от длительности отбора аэрозоля, 1-й уровень фильтрации каскада (поры 1,2 мкм) в течение: а – 5 мин; б – 10 мин; в – 20 мин; г – 120 мин; д – 2-й уровень фильтрации каскада (поры 0,2 мкм).

**Fig. 3.** Representative electron micrographs of the surface of nylon filters in the signal superposition mode (SE + BSE) depending on aerosol sampling duration at cascade filtration level 1 (a 1.2 μm pores): а – 5 min; б – 10 min; в – 20 min; г – 120 min; д – at cascade filtration level 2 (a 0.2 μm pores).

распределены по их поверхности. Исследование поверхности фильтров 2-го уровня показало отсутствие НЧ PbO, несмотря на увеличение размеров пор в шесть раз и времени отбора аэрозоля (5; 10; 20 и 120 мин).

## Обсуждение

Как было сказано ранее, NY-фильтры применяются для очистки и фильтрации жидкостей [13–15]. Однако результаты нашего исследования показали, что NY-фильтры также могут быть применены для отбора проб аэрозоля. Было обнаружено, что НЧ равномерно распределяются по поверхности фильтра вне зависимости от размера пор, а при отборе аэрозоля в течение 20 мин и более на поверхности фильтров в результате наслоения НЧ PbO друг на друга образуются агрегаты. Следовательно, при достижении теоретического порога загрузки фильтра в промежутке 0,3–0,6 мкг/см<sup>2</sup> НЧ общая картина состава аэрозоля исказится, и находящиеся в воздухе агрегаты будет невозможно отличить от агрегатов, искусственно образованных на поверхности фильтра. На поверхности фильтров 2-го уровня не было обнаружено НЧ PbO ни в одном из вариантов эксперимента, что может свидетельствовать о высокой степени эффективности улавливания частиц NY-фильтрами с размером пор 0,2 и 1,2 мкм при объемной скорости фильтрации 1,5 л/мин. Исследования по оценке эффективности сорбции НЧ нейлоновыми фильтрами проводились другими авторами и

ранее, однако изучались суспензии наночастиц золота размерами 5; 10 и 20 нм, которые были отфильтрованы через мембраны различных составов. Авторы связывают высокие значения адсорбции NY-фильтров с высоким электростатическим притяжением частиц в сравнении с фильтрами из других материалов [16].

## Заключение

Поскольку рискам и опасностям, вызываемым НЧ в воздушных системах, уделяется большое внимание, расширение методической базы принципиально для исследования и контроля вредных факторов. Полученные нами результаты являются первым шагом на пути к разработке новых методик идентификации и контроля содержания НЧ в воздухе рабочей зоны и атмосферном воздухе.

Настоящее исследование было проведено для определения возможности применения мембранных полиамидных (нейлоновых) фильтров при улавливании и идентификации НЧ в аэрозолях. Показано, что фильтры с порами 0,2 и 1,2 мкм имеют высокий потенциал улавливания НЧ.

В дальнейшем необходимы дополнительные исследования для установления точных характеристик эффективности улавливания НЧ: при различных скоростях отбора аэрозоля; в зависимости от диаметра пор фильтра; с иным химическим составом; в зависимости от загрузки фильтра; в зависимости от размера НЧ.

## Литература

(п.п. 3, 5–9, 11, 14, 16 см. References)

1. Лазаренков А.М. Исследование воздуха рабочих зон литейных цехов. *Литье и металлургия*. 2019; (2): 138–42. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-2-138-132>
2. Потапов А.И., Ракитский В.Н., Тулакин А.В., Луценко Л.А., Ильницкая А.В., Егорова А.М. и др. Особенности воздействия высокодисперсных аэрозолей и актуальные проблемы нанобезопасности. *Вестник Российского государственного медицинского университета*. 2013; (5–6): 119–23.
4. Гурвич В.Б., Кацнельсон Б.А., Рузаков В.О., Привалова Л.И., Бушueva Т.В., Гребенкина С.В. Биохимические эффекты у рабочих, подвергающихся влиянию аэрозолей металлургического производства меди, содержащих наночастицы. В кн.: *Материалы международной конференции «Актуальные гигиенические аспекты нанотоксикологии: теоретические основы, идентификация опасности для здоровья и пути ее снижения»*. Екатеринбург; 2016: 21–3.
10. Шаяхметов С.Ф., Лисецкая Л.Г., Меринов А.В. Гигиеническая оценка газопылевого фактора на алюминиевом предприятии Восточной Сибири. *Гигиена и санитария*. 2016; 95(12): 1155–60. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-12-1155-1160>
12. Уланова Т.С., Волкова М.В., Стенно Е.В., Недошитова А.В., Вейхман Г.А. Определение содержания редкоземельных элементов в аэрозолях воздуха рабочей зоны металлургического предприятия методом ИСП-МС. *Медицина труда и промышленная экология*. 2018; (10): 28–33. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2018-10-28-33>
13. Лаборатория воды. Мембранные дисковые фильтры. Доступно: <https://labfiltration.ru/magazin/folder/membrane>
15. Microtech. Фильтры и мембраны. Доступно: <https://ecolabmicrotex.ru/shop-category/merck-millipore/laboratornaya-filtratsiya/filtry-i-membrany/>

## References

1. Lazarenkov A.M. A study of the air quality of working areas in foundries. *Lit'e i metallurgiya*. 2019; (2): 138–42. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-2-138-132> (in Russian)
2. Potapov A.I., Rakitskiy V.N., Tulakin A.V., Lutsenko L.A., Il'nitskaya A.V., Egorova A.M., et al. Features of superfine aerosols' impact and actual problems of nanosafety. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta*. 2013; (5–6): 119–23. (in Russian)
3. Nho R. Pathological effects of nano-sized particles on the respiratory system. *Nanomedicine*. 2020; 29: 102242. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2020.102242>
4. Gurvich V.B., Katsnel'son B.A., Ruzakov V.O., Privalova L.I., Bushueva T.V., Grebenkina S.V. Biochemical effects in workers exposed to metallurgical copper aerosols containing nanoparticles. In: *Proceedings of the International Conference «Topics of Current Hygienic Importance in Nanotoxicology: Theoretical Premises, Hazards Identification and Ways of Their Attenuation» [Aktual'nye gigienicheskie aspekty nanotoksikologii: teoreticheskie osnovy, identifikatsiya opasnosti dlya zdorov'ya i puti ee snizheniya. Materialy mezhdunarodnoy konferentsii]*. Ekaterinburg; 2016: 21–3. (in Russian)
5. Katsnelson B.A., Degtyareva T.D., Minigalieva I.I., Privalova L.I., Kuzmin S.V., Yeremenko O.S., et al. Subchronic systemic toxicity and bioaccumulation of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nano- and microparticles following repeated intraperitoneal administration to rats. *Int. J. Toxicol.* 2011; 30(1): 59–68. <https://doi.org/10.1177/1091581810385149>
6. Sahu D., Kannan G.M., Vijayaraghavan R. Size-dependent effect of zinc oxide on toxicity and inflammatory potential of human monocytes. *J. Toxicol. Environ. Health A*. 2014; 77(4): 177–91. <https://doi.org/10.1080/15287394.2013.853224>
7. Singh M., Verma Y., Rana S. Potential toxicity of nickel nano and microparticles on the reproductive system of female rats: A comparative time-dependent study. *Toxicol. Ind. Health*. 2022; 38(4): 234–47. <https://doi.org/10.1177/07482337221074762>
8. Koyuda D.A., Titova S.S., Tsurikova U.A., Kakuliia I.S., Parinova E.V., Chuvenkova O.A., et al. Composition and electronic structure of porous silicon nanoparticles after oxidation under air- or freeze-drying conditions. *Mater. Lett.* 2022; 312: 131608. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131608>
9. Chen Y., Zhang W., Dong C., Hutchinson S.M., Feng H. Characteristics of iron-containing magnetic particles in household dust from an urban area: A case study in the megacity of Shanghai. *J. Hazard. Mater.* 2022; 424(Pt.A): 127212. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127212>
10. Shayakhmetov S.F., Lisetskaya L.G., Merinov A.V. Hygienic assessment of toxic dust factor at the aluminium smelter in eastern Siberia. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2016; 95(12): 1155–60. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-12-1155-1160> (in Russian)
11. Haghani A., Johnson R., Safi N., Zhang H., Thorwald M., Mousavi A., et al. Toxicity of urban air pollution particulate matter in developing and adult mouse brain: Comparison of total and filter-eluted nanoparticles. *Environ. Int.* 2020; 136: 105510. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105510>
12. Ulanova T.S., Volkova M.V., Stenno E.V., Nedoshitova A.V., Veykhman G.A. Assessment of rare earth elements by ICP-MS in workplace air of metallurgical enterprise. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2018; (10): 28–33. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2018-10-28-33> (in Russian)
13. Laboratoriya vody. Membrane disc filters. Available at: <https://labfiltration.ru/magazin/folder/membrane> (in Russian)
14. Sartorius. Membrane Filters by Sartorius. Available at: <https://www.sartorius.com/en/products/lab-filtration-purification/membranes>
15. Microtech. Filters and membranes. Available at: <https://ecolabmicrotex.ru/shop-category/merck-millipore/laboratornaya-filtratsiya/filtry-i-membrany/> (in Russian)
16. Lee H., Segets D., Süß S., Peukert W., Chen S.C., Pui D.Y.H. Retention mechanisms of 1.7 nm ZnS quantum dots and sub-20 nm Au nanoparticles in ultrafiltration membranes. *J. Membr. Sci.* 2018; 567: 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.09.033>