

DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-11-877-880>

УДК 613.6.028

© Цхомария И.М., 2020

Цхомария И.М.

**Контроль и гигиеническое нормирование загрязнения воздуха волокнистыми частицами**

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», пр-т Буденного, 31, Москва, Россия, 105275

**Введение.** Корректная оценка загрязнения воздуха волокнистыми частицами позволяет контролировать риски их воздействия на работников и население. Показатели загрязнения воздуха волокнистыми частицами отличаются от установленных для других видов пыли. Основными методами контроля являются оптическая и электронная микроскопия. Каждый из методов обладает преимуществами и недостатками, что должно быть отражено в соответствующих методических документах.

**Цель исследования** — апробация современных методик контроля загрязнения воздуха волокнистыми частицами.

**Материалы и методы.** Выполнен сравнительный анализ современных методов контроля загрязнения воздуха волокнами с практическим тестированием определения их счётных концентраций методом мембранных фильтров с помощью оптической фазово-контрастной (ФКОМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

**Результаты.** На основании натурных исследований, выполненных в различных отраслях промышленности, оценены преимущества и недостатки принятых в мире методов контроля загрязнения воздуха волокнистыми частицами.

**Заключение.** Основными методами определения волокон в воздухе являются ФКОМ и СЭМ. Разработка методических документов для определения счётных концентраций волокон в воздухе рабочей зоны и в атмосферном воздухе поможет обеспечить корректными оценками рисков при воздействии волокнистых частиц на работников и население.

**Ключевые слова:** волокнистые частицы; асбест; оптическая микроскопия; электронная микроскопия; гигиеническое нормирование

**Для цитирования:** Цхомария И.М. Контроль и гигиеническое нормирование загрязнения воздуха волокнистыми частицами. *Мед. труда и пром. экол.* 2020; 60(11): 877–880. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-11-877-880>

**Для корреспонденции:** Цхомария Ираклий Мамукович, мл. науч. сотр. ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова». E-mail: iraklytchomariya@mail.ru

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

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 16.11.2020 / Дата принятия к печати: 24.11.2020 / Дата публикации: 03.12.2020

Iraklij M. Tskhomariya

**Control and hygienic regulation of air pollution by fibrous particles**

Izmerov Research Institute of Occupational Health, 31, Budyonnogo Ave., Moscow, Russia, 105275

**Introduction.** The correct assessment of air pollution by fibrous particles allows controlling the risks of their exposure for workers and the general population. The indices for control of air pollution by fibrous particles differs from established for other dusts. The main control methods are optical and electron microscopy. Each method has its own advantages and disadvantages, which should be reflected in the national regulatory framework.

**The aim of study** — to test the modern methods for the control of air pollution by fibrous particles.

**Materials and methods.** A comparative analysis of modern methods for controlling air pollution by fibres with practical testing of determining their numerical concentrations by the method of membrane filters using optical phase contrast (PCOM) and scanning electron microscopy (SEM) was performed.

**Results.** Based on field studies performed in various industries, the advantages and disadvantages of the methods used in the world to control air pollution by fibrous particles were evaluated.

**Conclusions.** The main methods for determining fibers in the air are PCM and SEM/EDXA. The development of regulatory documents for calculating the numerical concentrations in the work area air and in the ambient air will help to ensure the correct risk assessments for occupational and non-occupational exposure of fibrous particles.

**Keywords:** fibrous particle; asbestos; optical microscopy; electron microscopy; hygienic regulation

**For citation:** Tskhomariya I.M. Control and hygienic regulation of air pollution by fibrous particles. *Med. truda i prom. ecol.* 2020; 60(11): 877–880. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-11-877-880>

**For correspondence:** Iraklij M. Tskhomariya, junior researcher of Izmerov Research Institute of Occupational Health. E-mail: iraklytchomariya@mail.ru

**Funding.** The study has no funding.

**Conflict of interests.** The author declares no conflict of interests.

Received: 16.11.2020 / Accepted: 24.11.2020 / Published: 03.12.2020

**Введение.** В настоящее время природные и химические волокна широко применяются в промышленности и входят в состав самых разнообразных материалов. Основными типами волокон, используемых в настоящее время, являются природные (асбесты и др.) и искусственные минеральные (стекловата, камневата и др.). Волокна могут высвобождаться в воздух в результате механического воздействия на содержащие их материалы, при распылении (например, в случае нанесения изоляционных материалов), естественном выветривании горных пород.

С начала 30-х годов XX века было проведено большое количество исследований влияния различных волокнистых частиц на организм человека. Особое внимание было приковано к асбестам (торговое название различных групп волокнистых минералов, охватывающее силикаты железа, входящие в амфиболовую группу и силикат магния, входящий в группу серпентинов), поскольку они наиболее широко использовались во всем мире со второй половины XIX столетия. Вскоре появились доказательства того, что бесконтрольное применение асбестов приводит к росту

числа заболеваний, которые впоследствии стали называться асбестобусловленными (асбестоз, рак легких, мезотелиома и др.) не только среди работников, но и населения, не имевшего профессионального контакта с ним. Однако экспериментальные исследования давали разные результаты в зависимости от условий проведения [1, 2]. Только накопление данных и крупные эпидемиологические исследования позволили лучше понимать проблему. Свойства различных типов волокон обуславливают различия в их способности оказывать негативное воздействие на здоровье человека [1]. Также показано, что учёт дозы и типа волокон имеет большое значение в определении количественных рисков развития заболеваний [3]. Отличительной особенностью волокнистых частиц от частиц других видов пыли аэрозолей преимущественно фиброгенного действия (АПФД) является их форма, что предполагает особые механизмы проникновения в организм человека и воздействия на него [2]. Соответственно и методы контроля отличаются от принятых для других видов АПФД.

В настоящее время в мировой практике счётные концентрации волокон определяются с использованием оптической (фазово-контрастной микроскопии — ФКОМ) или электронной микроскопии (сканирующей или трансмиссионной электронной микроскопии — СЭМ или ТЭМ). Подсчитываются «респираторные» волокна (согласно определению ВОЗ, частицы длиной  $\geq 5$  микрометров (мкм), диаметром  $\leq 3$  мкм и их соотношением  $\geq 3/1$ ). Для предположения о наличии волокон в воздухе необходимо иметь знания о материалах, их содержащих, поскольку использование других методов контроля [4] может приводить к некорректной оценке возможных рисков для здоровья работников и населения.

**Цель исследования** — апробация современных методик контроля загрязнения воздуха волокнистыми частицами.

**Материалы и методы.** Определение концентраций волокон в воздухе проводилась методом мембранных фильтров. Воздух протягивался через фильтры с размером пор 0,8 мкм, которые затем анализировались с помощью ФКОМ и электронной сканирующей микроскопии (СЭМ). Для определения типа волокон использовался метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС). Выполнена серия из 11 параллельных отборов проб (всего 90 проб) на различных площадках (открытых и в производственных помещениях) для последующего анализа методами ФКОМ и СЭМ. Продолжительность отбора составляла от 30 минут до 5 часов со скоростью отбора от 5 до 15 литров в минуту. Волокна на фильтрах подсчитывались не менее чем на 100 полях зрения оптического и 200 полях зрения электронного микроскопа. Методами ФКОМ и СЭМ подсчитывались частицы длиной  $\geq 5$  мкм, диаметром  $\leq 3$  мкм и их соотношением  $\geq 3/1$ . В соответствии с современными требованиями для обеспечения сопоставимости результатов ФКОМ и СЭМ методом СЭМ подсчитывали только волокна с диаметром не менее 0,25 мкм.

**Результаты и обсуждение.** Поскольку в России практически нет документов для определения счетных концентраций волокон (МУК 4.1.666-97 требует пересмотра, поскольку в них имеется ряд неточностей, а ГОСТ Р ИСО 16000-7-2011 не адаптирован для условий гигиенического нормирования нашей стране), нами реализовано тестирование принятых в мировой практике методов исследования (таких как ISO 14966, VDI 3492, WHO 1997 и др.).

В данной статье представлены только результаты сравнительной качественной оценки тестируемых методов.

Отработана технология отбора проб воздуха рабочей зоны и атмосферного воздуха населённых мест для определения счётных концентраций волокнистых частиц.

Показана значимость корректного выбора объёма отобранного воздуха (продолжительности и скорости отбора) в зависимости от степени его загрязнения, поскольку при интенсивном загрязнении фильтр может оказаться перегружен, и наоборот, недостаточная загрузка фильтра исключает возможность корректного определения счётных концентраций волокон (для этого на 100 полях зрения должно присутствовать не менее 10 отвечающих критериям подсчёта волокнистых частиц).

Выбор типа мембранного фильтра в зависимости от методики является важным моментом. Для ФКОМ возможно использование только растворимых в парах ацетона целлюлозных мембранных фильтров с диаметром пор 0,8 мкм. Для СЭМ предпочтительно использование поликарбонатных фильтров с тем же диаметром пор, но возможно и использование нитроцеллюлозных фильтров.

Оценены преимущества и недостатки ФКОМ и СЭМ. ФКОМ является самым доступным с точки зрения стоимости и технологии выполнения видом микроскопии для определения счётных концентраций, однако имеет и недостатки: при исследовании невозможно определить тип волокон, к тому же волокна тоньше 0,15 мкм (а на практике 0,2–0,25) не могут обнаруживаться. Также невелика чувствительность этого метода — предел обнаружения составляет 0,01 волокна в миллилитре воздуха (10 000 волокон в метре кубическом) и существенно повышается с повышением уровня общего загрязнения воздуха твёрдыми частицами, так как корректный подсчёт волокон на «перегруженном» фильтре не представляется возможным.

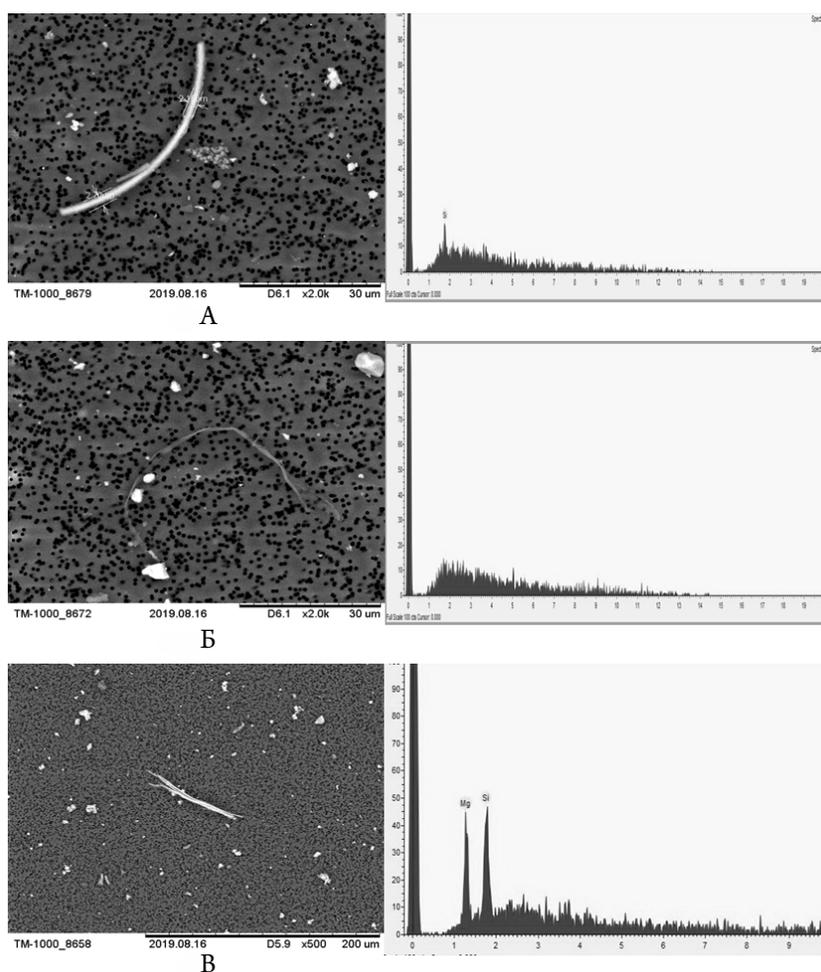
Электронная микроскопия обладает большей разрешающей способностью, что позволяет видеть больше частиц с малым диаметром. К тому же ЭДРС позволяет в большинстве случаев определить тип волокна. Следует отметить высокую чувствительность метода. При условии отбора достаточного объёма воздуха имеется возможность фиксировать концентрации до 200 волокон в метре кубическом. Но стоит понимать, что высокая стоимость оборудования (СЭМ и ТЭМ) делает этот метод сравнительно малодоступным для широкого практического применения. Кроме того, большую роль играет квалификация оператора, выполняющего данные исследования [5]. Поэтому для большинства лабораторий наиболее доступным методом будет являться ФКОМ.

Также было показано, что анализ проб с помощью электронной микроскопии без дополнительной обработки фильтра (без плазменного сжигания, нанесения покрытий золотом или углеродом, как это предлагается в некоторых стандартах) позволяет определять тип волокон, их размеры и, следовательно, производить необходимые расчеты. Примеры видов волокон и их спектральный элементный состав показаны на *рисунке*.

С учетом всего выше сказанного стоит отметить следующие положения:

1. Необходимо проводить обучение сотрудников методам отбора и приготовления проб, поскольку фильтры для ФКОМ требуют специальной обработки для получения изображения видимых волокон.

2. Перед отбором проб воздуха для ФКОМ следует проводить оценку потенциальных источников загрязнения



**Рисунок. Изображения волокон под электронным микроскопом и их спектральный элементный состав: А — искусственное минеральное волокно, Б — органическое волокно, В — природное минеральное волокно (хризотилловый асбест).**

**Figure. Fibers under an electron microscope and their spectral elemental composition: А — artificial mineral fiber, Б — organic fiber, В — natural mineral fiber (chrysotile asbestos).**

воздуха с точки зрения содержания в них тех или иных типов волокон.

3. При выборе метода контроля в зависимости от задач исследования следует учитывать преимущества и недостатки рассмотренных методов. Например, в случае, когда заранее известен преимущественный тип волокон в воздухе на обследуемом предприятии (как на предприятиях по добыче и обогащению асбеста, предприятиях по производству материалов и изделий, содержащих асбест или искусственные минеральные волокна) при соблюдении определённых правил методик подсчёта ФКОМ и СЭМ дают сопоставимые результаты. В остальных случаях следует использовать электронную микроскопию или комбинировать методы.

Корректная гигиеническая оценка загрязнения возду-

ха как природными, так и искусственными минеральными волокнами необходима для выявления источников загрязнения, а также для последующей оценки возможных рисков для здоровья работников и населения, которые могут подвергаться их воздействию.

**Заключение.** Основными методами определения волокон в воздухе являются ФКОМ и СЭМ/ЭРАС. Гигиеническое нормирование волокнистых частиц в воздухе рабочей зоны и в атмосферном воздухе позволяет контролировать риски их воздействия на работников и население. Разработка и внедрение методических документов по определению счетных концентраций в воздухе рабочей зоны и в атмосферном воздухе поможет обеспечить корректные оценки рисков при профессиональном и непрофессиональном воздействии волокнистых частиц.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bernstein D.M., Hoskins J.A. The health effects of chrysotile: Current perspective based upon recent data. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2006; 45: 252–264.
- Lippman M. Asbestos Exposure Indices. *Environmental research*. 1998; 46: 86–106.
- Hodgson J.T., Darnton A. The Quantitative Risks of Mesothelioma and Lung Cancer in Relation to Asbestos Exposure. *Annals of Occupational Hygiene*. 2000; 44 (8):

- 565–601.
4. Копытенкова О.И., Турсунов З.Ш., Леванчук А.В., Мироненко О.В., Фролова Н.М., Сазонова А.М. Гигиеническая оценка условий труда в отдельных профессиях строительных организаций. *Гигиена и санитария*. 2018; 97(12): 1203–1209.
5. Ghorbani S., Hajizadeh Y., 2016. Monitoring of airborne asbestos fiber concentrations in high traffic areas of Isfahan, Iran in summer 2015. *International Journal of Environmental Health Engineering*. 2016; 5: 8–13.

#### REFERENCES

1. Bernstein D.M., Hoskins J.A. The health effects of chrysotile: Current perspective based upon recent data. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2006; 45: 252–64.
2. Lippman M. Asbestos Exposure Indices. *Environmental research*. 1998; 46: 86–106.
3. Hodgson J.T., Darnton A. The Quantitative Risks of Mesothelioma and Lung Cancer in Relation to Asbestos Exposure. *Annals of Occupational Hygiene*. 2000; 44 (8): 565–601.
4. Kopytenkova O.I., Tursunov Z.Sh., Levanchuk A.V., Mironenko O.V., Frolova N.M., Sazonova A.M. The hygienic assessment of the working environment in individual occupations in building organizations. *Gigiyena i sanitariya*. 2018; 97(12): 1203–1209.
5. Ghorbani S., Hajizadeh Y., 2016. Monitoring of airborne asbestos fiber concentrations in high traffic areas of Isfahan, Iran in summer 2015. *International Journal of Environmental Health Engineering*. 2016; 5: 8–13.
-