

EDN: <https://elibrary.ru/rgeqwv>

DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-11-730-739>

УДК 613.633 + 614.715+613.6.02

© Коллектив авторов, 2024

Цхомария И.М.¹, Ковалевский Е.В.^{1,2}, Федорук А.А.³, Другова О.Г.³

Методическое обеспечение мер по контролю и мониторингу воздействия промышленных волокон на здоровье человека

¹ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», пр-т Будённого, 31, Москва, 105275;

²ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский Университет), ул. Трубецкая, 8, стр. 2, Москва, 119991;

³ФБУН «Екатеринбургский медицинский-научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора, ул. Попова, 30, Екатеринбург, 620014

Промышленные волокна и содержащие их материалы в настоящее время широко используются в промышленном и гражданском строительстве, многих других отраслях народного хозяйства. Методические подходы к контролю их воздействия на работников и население в нашей стране требуют совершенствования. В связи с этим были разработаны проекты четырёх новых методик, а также внесены изменения в одну существующую. Две методики касаются определения счётных концентраций промышленных волокон в воздухе рабочей зоны и окружающей среде с помощью фазово-контрастной оптической и сканирующей электронной микроскопии, при этом методика сканирующей электронной микроскопии видится первичной, позволяющей определять виды промышленных волокон в воздухе, а фазово-контрастная оптическая микроскопия является оптимальным методом для производственного контроля. Ещё две взаимодополняющие методики содержат алгоритм обследования объектов различного назначения с целью выявления потенциальных источников загрязнения воздуха промышленными волокнами и выявления факта загрязнения воздуха в прошлом, что позволяет оценить риски (вероятность) загрязнения воздуха промышленными волокнами. Действующая методика измерения массовой концентрации пыли в воздухе рабочей зоны не соответствует действующему законодательству и не позволяет сравнить полученные результаты измерений отдельных видов пыли с имеющимися нормативами. Предложенные методы апробированы натурными исследованиями, гармонизированы с аналогичными зарубежными для возможности сравнения.

Ключевые слова: промышленные волокна; асбест; искусственные минеральные волокна; пыль; загрязнение воздуха; гигиенические исследования

Для цитирования: Цхомария И.М., Ковалевский Е.В., Федорук А.А., Другова О.Г. Методическое обеспечение мер по контролю и мониторингу воздействия промышленных волокон на здоровье человека. *Мед. труда и пром. экол.* 2024; 64(11): 730–739. <https://elibrary.ru/rgeqwv> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-11-730-739>

Для корреспонденции: Цхомария Ираклий Мамукович, e-mail: iraklytchomariya@mail.ru

Участие авторов:

Цхомария И.М. — сбор данных литературы, написание текста, разработка концепции и дизайна исследований, сбор первичного материала и обработка данных, ответственность за целостность всех частей статьи;

Ковалевский Е.В. — разработка концепции и дизайна исследований, сбор первичного материала и обработка данных, ответственность за целостность всех частей статьи, редактирование, утверждение окончательного варианта статьи;

Федорук А.А. — сбор данных литературы, написание текста, разработка концепции и дизайна исследований, сбор первичного материала и обработка данных, ответственность за целостность всех частей статьи, редактирование;

Другова О.Г. — сбор данных литературы, написание текста, разработка концепции и дизайна исследований, сбор первичного материала и обработка данных, ответственность за целостность всех частей статьи.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 01.11.2024 / **Дата принятия к печати:** 06.11.2024 / **Дата публикации:** 27.11.2024

Iraklii M. Tskhomariia¹, Evgeny V. Kovalevskiy^{1,2}, Anna A. Fedoruk³, Olga G. Drugova³

Methodological support for measures to control and monitor the effects of industrial fibers on human health

¹Izmerov Research Institute of Occupational Health, 31, Budyonnogo Ave, Moscow, 105275;

²I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), 8/2, Trubetskaya St, Moscow, 119991;

³Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, 30, Popova St, Yekaterinburg, 620014

Industrial fibers and materials, containing industrial fibers, are currently widely used in industrial and civil construction, and many other sectors of the national economy. Methodological approaches for monitoring workers and general population exposure to these fibers in the country should be improved. In this regard, drafts of four new methodical documents were developed, and one of existing methodical document was changed. Two documents are related to the determination of concentrations of industrial fibers in the air of a working zone and environment using phase-contrast optical and scanning electron microscopy. The scanning electron microscopy technique is considered as primary, allowing the determination of the types of industrial fibers in the air, and phase-contrast optical microscopy is the appropriate method for use at the relevant industrial enterprises. Two other interconnected documents contain an algorithm for examining various objects in order to identify potential sources of air pollution by industrial fibers and, also the fact of former air pollutions, which will allow assessing the risks (probability) of workers and general population exposure to industrial fibers. The proposed methods have been tested by field studies and harmonized with similar foreign ones to allow comparison. The current method of measuring

of the mass concentration of dust in the air of the working zone does not comply with the current legislation and does not allow comparing the obtained results of measurements of individual types of dust with the existing national standards.

Keywords: *industrial fibers; asbestos; artificial mineral fibers; dust; air pollution; hygienic research*

For citation: Tskhomariia I.M., Kovalevsky E.V., Fedoruk A.A., Drugova O.G. Methodological support for measures to control and monitor the effects of industrial fibers on human health. *Med. truda i prom. ekol.* 2024; 64(11): 730–739. <https://elibrary.ru/rgeqvw> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-11-730-739> (in Russian)

For correspondence: Iraklii M. Tskhomariia, e-mail: iraklytchomariya@mail.ru

Contribution:

Tshomaria I.M. — collection of literature data, writing of the text, development of the concept and design of research, collection of primary material and data processing, responsibility for the integrity of all parts of the article;

Kovalevskiy E.V. — development of the concept and design of research, collection of primary material and data processing, responsibility for the integrity of all parts of the article, editing, approval of the final version of the article;

Fedoruk A.A. — collection of literature data, writing of the text, development of the concept and design of research, collection of primary material and data processing, responsibility for the integrity of all parts of the article, editing;

Drugova O.G. — collection of literature data, writing of the text, development of the concept and design of research, collection of primary material and data processing, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Funding. The study had no funding.

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

Received: 01.11.2024 / Accepted: 06.11.2024 / Published: 27.11.2024

Промышленные волокна¹ (ПВ) за счёт своих уникальных свойств имеют важное значение для современной промышленности. Особое внимание привлекают природные (наиболее известным представителем которых являются асбесты двух групп: серпентинов (единственно разрешённый в настоящее время в промышленном использовании представитель асбестов — хризотиловый асбест (ХА)) и амфиболов (использование запрещено в большинстве стран мира, в России в гражданских целях практически не использовались)) и искусственные минеральные волокна (ИМВ: каменное, стеклянное, шлаковое, базальтовое, керамическое огнеупорное и др.), поскольку являются наиболее известными и распространёнными представителями ПВ. Они входят в состав разнообразных материалов (строительных, изоляционных, лакокрасочных и других), а также могут встречаться в качестве примесей в различных видах минерального сырья (характерно для природных минеральных волокон: в тальке, вермикулите, нефrite и др.).

Свойства ПВ проявились и в возможности неблагоприятного воздействия на здоровье человека. По современным представлениям о патогенетических механизмах неблагоприятного воздействия волокон на здоровье наибольшее значение имеют размерные характеристики (вне зависимости от происхождения: органические или минеральные, природные или искусственные), такие как диаметр, определяющий их аэродинамические свойства и возможность проникновения в глубокие отделы органов дыхания и другие органы, длина, определяющая основной механизм патогенеза в виде невозможности выведения длинных волокон из лёгких путём их полного захвата фагоцитами, что приводит к нарушению фагоцитоза (явление «незавершённого фагоцитоза») и последующей воспалительной реакции; при этом химический состав и кристаллическая структура волокон влияют на их биопрессентность — способность задерживаться в организме в неизменном виде (в биологических средах длинные волокна, имеющие растворимые компоненты, разрушаются на более мелкие фрагменты, тем самым облегчая процесс выведения). Таким образом, длинные, тонкие и биопрессентные волокна играют наибольшую роль в патогенезе, поскольку могут длительно задержи-

ваться в лёгких, мигрировать в плевральную или другую мезотелиальную ткань, вызывать воспалительные и гранулематозные процессы, в том числе приводящие к развитию злокачественных новообразований — рака лёгких и других локализаций, мезотелиомы (плевры, брюшины, перикарда и т. д.) [1]. Однако споры о влиянии многих ПВ на здоровье организма ведутся до сих пор. Если для всех видов асбеста показаны фиброгенные и канцерогенные свойства, хотя для ХА риски развития таких последствий для здоровья человека в реальных условиях производственного и непроизводственного воздействия многократно меньше по сравнению с амфиболовыми асбестами [2, 3], то большинство ИМВ заявляются производителями как «безопасные» аналоги асбеста, так как для большинства из них эпидемиологических и лабораторных данных недостаточно для классификации канцерогенности [4]. При этом следует отметить, что выводы Монографии Международного агентства по изучению рака (МАИР), касающейся классификации канцерогенных свойств большинства ИМВ (группа 3 по классификации МАИР) [4], подвергаются сомнению многими авторами, указывающими, что рабочая группа Монографий МАИР выбирала в качестве определяющих опасность канцерогенного действия ИМВ ингаляционные исследования, но не учитывала интраперитонеальные, в которых показана канцерогенность ИМВ, к тому же ряд исследований вызывают вопросы в методологии проведения и т. д. [5]. Рабочая группа по оценке механизмов канцерогенеза волокон и оценке заменителей ХА [6] показала, что полностью безопасных волокон не существует, а большое количество ПВ, в том числе биопрессентные ИМВ респирабельного размера («респирабельные» волокна — волокна, имеющие следующие размерные характеристики: длина более 5 микрометров (мкм), диаметр менее 3 мкм и соотношение длины к диаметру более чем 3 к 1), представляют высокую канцерогенную опасность, схожую с таковой амфиболовых асбестов, использование которых запрещено во всём мире. Европейский Союз относит большинство ИМВ как предположительные и возможные канцерогены для человека [7], при этом в Германии производство ряда ИМВ запрещено [5]. Систематические обзоры и метаанализы данных о профессиональном воздействии ИМВ показывают повышенный риск развития злокачественных новообразований лёгких [8, 9], хотя и ссылаются на ряд ограничений в исследованиях и в этой связи трудность

¹ Термин «промышленные волокна» вводится в качестве объединяющего природные и искусственные волокна различного происхождения, входящие в состав промышленных материалов.

в установлении действительной взаимосвязи между воздействием и заболеванием. При этом следует отметить, что производители ИМВ учли опыт бесконтрольного применения асбеста, в связи с чем предпринимаются серьёзные меры по снижению воздействия. Также имеются сведения о раздражающем действии ИМВ на кожу и слизистые [10, 11], о развитии фиброзных изменений в лёгких работников, имевших профессиональный контакт с ИМВ [12], саркоидозной гранулёмы [13].

В связи с вышеуказанным целью данной работы является научное обоснование методического обеспечения мер по контролю и мониторингу воздействия ПВ на здоровье человека вне зависимости от их происхождения (и, соответственно, аналогичность превентивных мер безопасности как при работах с асбестом, так и ИМВ).

Для контроля содержания волокнистых частиц в воздухе рабочей зоны и атмосферном воздухе во всём мире применяют метод мембранных фильтров, который позволяет определять счётные концентрации волокон в воздухе с помощью использования фазово-контрастной оптической микроскопии (ФКОМ) или сканирующей/трансмиссионной электронной микроскопии (СЭМ/ТЭМ). Подсчёту подлежат частицы, отвечающие определению «респирабельных», за исключением США, где в методике, разработанной Национальным институтом профессиональной безопасности и здоровья (NIOSH), представлены несколько иные правила². При этом следует отметить, что под термином «волокно» понимается нормативное определение, а не его действительная минералогическая структура (поскольку, например, оптический микроскоп не позволяет различать частицы, имеющие сходную волокнистую (волокнистоподобную) структуру, например, игольчатые минералы от удлинённых минеральных частицы — фрагментов минералов или любых других частиц, имеющих соответствующие размерные характеристики) [14].

Каждая из методик имеет преимущества и недостатки. ФКОМ является наиболее доступным методом с экономической точки зрения, отличается быстрой пробоподготовкой, однако не позволяет различать морфологию частиц и классифицировать вид волокон, а также различать волокна диаметром менее 0,2–0,4 мкм, поэтому полученные результаты являются лишь частью (индикатором) численной концентрации частиц в воздухе, отвечающих определению «счётного волокна», а не абсолютным значением всех присутствующих волокон. СЭМ лишена практических недостатков ФКОМ ввиду разрешающей способности (при обычном оперировании современные модели позволяют различать самые тончайшие волокна) и возможности с помощью встроенной в микроскоп установки для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС) определять качественный и полуколичественный (в виде массовой доли) элементный состав и морфологию волокнистых частиц и, таким образом, классифицировать на соответствующие виды волокон, однако является дорогим и достаточно трудоёмким (ввиду расширенных возможностей анализа) методом. Применение методики СЭМ предлагается в качестве первичной методики для проведения первичной гигиенической оценки воздуха рабочей зоны или атмосферного воздуха/воздуха жилых и обще-

ственных зданий, позволяющей определить качественный состав и счётные концентрации всех видов присутствующих в воздухе ПВ, а применение методики ФКОМ — для проведения анализа в рамках производственного контроля и надзорной деятельности ввиду её большей доступности, что позволяет иметь индикаторные показатели счётных концентраций для принятия управлеченческих решений.

Для внедрения в отечественную практику разработаны проекты двух методик: «Методика определения концентраций волокнистых частиц в атмосферном воздухе, воздухе замкнутых помещений и в воздухе рабочей зоны методом сканирующей электронной микроскопии» (далее — методика СЭМ) и «Методика определения концентраций волокнистых частиц в атмосферном воздухе, воздухе замкнутых помещений и воздухе рабочей зоны методом оптической фазово-контрастной микроскопии»³ (далее — методика ФКОМ). Их разработка обусловлена тем, что в настоящее время имеется одна отечественная методика для атмосферного воздуха⁴, требующая пересмотра в связи с ограничением применения только для волокон асбеста и рядом неточностей, а переведённые зарубежные документы^{5,6} содержат ряд некорректных для использования в Российской Федерации положений. Проекты методик СЭМ и ФКОМ разработаны с учётом положений международных и зарубежных стандартов и были одобрены в отечественной практике. Особыми положениями в них являются подробно описанные методы контроля качества проведённых измерений, статистическая обработка данных, особенности оборудования, принципы методов измерений и область применения, дополнительные материалы и приложения, которые были подготовлены с учётом как собственных практических исследований, так и данных научных публикаций и схожих зарубежных методик по тематике. Для методики СЭМ было подготовлено описание проведения анализа, исключающего дополнительную процедуру пробоподготовки, что позволяет проводить оценку загрязнения воздуха органическими частицами, в том числе имеющими волокнистоподобную структуру (приведены данные по идентификации подобных частиц за счёт морфологии и спектрального состава), а также демонстрирует возможность волокнистых частиц агрегировать за счёт присутствия в пробах органических веществ в плотные матричные структуры, которые могут разрушаться при пробоподготовке, тем самым способствуя завышению счётных концентраций. Важно отметить, что в методике СЭМ прописаны положения, позволяющие определять концентрации волокон, эквивалентные при подсчёте методом ФКОМ (ограничение определения волокон диаметром менее 0,2 мкм).

Поскольку методика ФКОМ фактически не отличается от действующей в части проведения подсчёта волокон, она одобрена на ряде производственных и других объектах, где демонстрирует схожие с зарубежными

³ Примечание: названия методик могут быть изменены.

⁴ МУК 4.1.666-97 «Методические указания по измерению концентрации волокон асбеста в атмосферном воздухе населённых мест».

⁵ ГОСТ Р ИСО 16000-7:2007 «Воздух замкнутых помещений. Часть 7. Отбор проб при определении содержания волокон асбеста»; Методика из Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений № ФР.1.37.2014.18743.

⁶ ГОСТ Р ИСО 14966-2022 Атмосферный воздух. Определение концентрации неорганических волокнистых частиц. Метод сканирующей электронной микроскопии.

² Два вида правил: для асбеста — длина >5 мкм и соотношение длины к диаметру ≥3:1, для других волокон — длина >5 мкм, диаметр <3 мкм, соотношение длины к диаметру ≥5:1. <https://www.cdc.gov/niosh/nmam/pdf/7400.pdf>

данными значения [15–18], а методика СЭМ без учёта соответствующей зарубежным методикам пробоподготовки также демонстрирует эффективность в применении и сопоставимые с существующими исследованиями данные [15, 17–20]. Актуальность принятия разработанных проектов заключается в том, что обе методики позволяют провести оценку загрязнения воздуха любыми ПВ (в том числе при разработке гигиенических нормативов для новых), закрыть определённый пробел в санитарном законодательстве (в первую очередь, при выборе нормативного показателя ПВ по массовой концентрации пыли [21]), что позволит проводить надлежащим образом оценку условий труда при экспертизе связи заболевания с профессией, эпидемиологические исследования (как и во всём мире, по счётым концентрациям) [3, 4].

Важно отметить, что полученные разными методами значения счётыных концентраций следует сравнивать с осторожностью с учётом вышеуказанных свойств обоих методов и особенностей оцениваемых технологических процессов (и используемых материалов, содержащих ПВ). Концентрации волокон при использовании методов ФКОМ и СЭМ могут быть сопоставимы (например, на предприятии по добыче и обогащению асбеста, где присутствуют только один тип волокон [22]) или различаться (в сравнительных анализах за счёт более высокого разрешения метода СЭМ — возможности определения волокон меньших размеров, различия типов ПВ и/или образующихся в результате разрушения материала волокнистоподобных частиц⁷ [23]). При исследовании непроизводственных условий данные, полученные методом ФКОМ, могут быть существенно выше, чем методом СЭМ, за счёт присутствия в воздухе большого количества частиц, которые при использовании оптического микроскопа будут учитываться как ПВ за счёт размерных характеристик [24]. Соответственно, метод СЭМ позволяет оценить долю волокон, которые необходимо учитывать при оценке воздействия конкретных видов ПВ в случае дальнейшего использования метода ФКОМ.

Материалы, содержащие ПВ, часто встречаются в производственных помещениях, жилых и общественных зданиях, в городской среде. Но они не идентифицируются как потенциальный источник загрязнения воздуха. Как правило, счёты концентрации ПВ в жилых, коммерческих/производственных и общественных зданиях, где имеются содержащие их материалы, составляют порядка 0,001 волокна в миллилитре (в/мл) и редко превышают показатель 0,01 в/мл [25–27]. В исследовании [28] показано, что средняя концентрация в зданиях с асбестосодержащими материалами низкой плотности (плотность указывает на связанность асбеста с матриксом материала) была выше (0,6 волокна в литре (в/л)), чем в зданиях, где использовались только асбестсодержащие материалы высокой плотности (порядка 0,1 в/л).

К сожалению, как показывает практика, в большинстве случаев ответственные за эксплуатацию объектов и зданий часто не имеют представления о наличии, состоянии, локализации материалов, содержащих ПВ, и, соответственно, плохо понимают те риски загрязнения воздуха ПВ, которые могут возникать в связи со старением и разрушением/повреждением, при ненадлежащем использовании таких

⁷ Частицы, визуально соответствующие параметрам «счётыного волокна», но отличающиеся морфологией (иногда и элементным составом) — удлинённые минеральные частицы, игольчатые и ленточные минералы и т. д.

материалов или при воздействии на них (т. е. реализации процессов, способствующих выделению волокон в воздух). Наибольшую угрозу здоровью материалы, содержащие ПВ, могут представлять персоналу, ответственному за техническое обслуживание зданий и сооружений или ведущему строительные или ремонтные работы, демонтаж или снос конструкций и т. п., поскольку при непосредственном воздействии на такие материалы волокна могут выделяться в воздух в значительных количествах, но подобное воздействие, как правило, не оценивается. В одном из исследований [29] было показано, что средние концентрации волокон асбеста при проведении ремонтных работ по удалению материалов высокой плотности (асбестоцементные изделия, напольные покрытия, формованные пластики, сальники и др.) влажным способом составляли 0,001–0,05 в/мл, а сухим способом — 0,01–0,2 в/мл; однако при удалении материалов низкой плотности (асбестовые изоляционные плиты и напыляемые и другие виды изоляционных материалов) концентрации респирабельных волокон в воздухе рабочей зоны составляли 0,41–14,4 в/мл и 15–358 в/мл соответственно.

Наиболее рациональной мерой профилактики воздействия ПВ на работников и население представляется выявление содержащих их материалов и оценка их состояния с точки зрения риска выделения свободных ПВ в воздух. В связи с этим были разработаны проекты двух взаимодополняющих методик: «Методических указаний по идентификации природных и искусственных минеральных волокон в образцах материалов и пыли методом сканирующей электронной микроскопии и их классификации методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии» и «Методических рекомендаций по проведению визуально-инструментального обследования производственных, жилых и общественных зданий с целью идентификации потенциальных источников загрязнения воздуха природными и искусственными минеральными волокнами», — с учётом положений уже давно и успешно использующихся на практике аналогичных зарубежных и международных методических документов («Asbestos: the survey guide. Health and safety guidance: HSG264» (Великобритания), «ASTM E2356-18 Standard Practice for Comprehensive Building Asbestos Surveys» (США)) и стандартов по изучению проб материалов и пыли (ISO 22262-1 «Air quality — Bulk materials — Part 1: Sampling and qualitative determination of asbestos in commercial bulk materials», NEN 2991 «Air — Risk assessment in and around buildings or structures containing asbestos-laden materials» (Нидерланды)). В предлагаемой отечественной методике по обследованию убраны чрезмерные меры профилактики воздействия, связанные с коммерциализацией «асбестобоязни» в странах ЕС и США, указаны типовые материалы с учётом всех видов минеральных ПВ, упрощены процедуры обследования для более быстрого его проведения. Следуя предлагаемым алгоритмам, специалисты могут проводить обследования объектов и зданий, выявлять потенциально содержащие ПВ материалы и отбирать их пробы для анализа, проводить их оценку для выявления риска высвобождения свободных волокон в воздух, отбирать пробы осевшей пыли, анализировать все виды проб с помощью СЭМ и классифицировать волокна с использованием ЭДРС. Полученные результаты дадут возможность принимать обоснованные, необходимые и достаточные управленческие решения по предотвращению воздействия ПВ на работников и население в концентрациях,

которые могут представлять опасность для здоровья человека.

Анализ материалов позволяет выявлять в них наличие/отсутствие определённых типов ПВ и, таким образом, классифицировать материалы как потенциальные источники выделения ПВ, а обнаружение ПВ в образцах пыли — расценивать как факт выделения волокон в воздух из конкретных материалов (при отборе проб рядом находящихся материалов) или из других источников (занос из других помещений или из атмосферного воздуха). В проекте отечественной методики внесённые изменения в ранее существовавшие в зарубежных странах методики по определению ПВ в пыли и материалах фактически идентичны методу СЭМ для определения счётных концентраций ПВ: убран ряд положений пробоподготовки, добавлены вспомогательные материалы для анализа различных видов ПВ.

Результаты части проведённых обследований с использованием разработанных методик опубликованы нами ранее. Были проведены отбор 169 проб материалов, предположительно содержащих ПВ, и их оценка состояния в различных производственных и общественных зданиях, и в результате в 85 обнаружен ХА, в 34 — ИМВ, в 18 — органические, в 32 — волокна отсутствовали [15]. Анализ 57 проб осевшей пыли на тех же объектах выявил в 26 пробах только ИМВ, в 3 — только ХА, а в 9 — ИМВ и ХА [15]. В другом исследовании [19] методика позволила выявить в 10 образцах почвы высокое содержание волокон антофиллита и магнезиоарфедсонита (минерала амфиболовой группы: часто представляется в виде призматических кристаллов или реже — волокнистых агрегатов), которые могут вымываться водой из расположенного рядом затопленного карьера на берег (или обратно), выветриваться и быть источником загрязнения атмосферного воздуха волокнами амфиболовых асбестов. Также было подтверждено наличие ХА в образце щебеноочисточного асфальтобетона, при этом в 2 из 3 проб пыли были обнаружены пучок и 2 конгломерата волокон, что может свидетельствовать о высвобождении их из дорожного покрытия [20]. Аналогичные обследования с отбором проб потенциально содержащих ПВ материалов, образцов пыли для выявления источников и факта загрязнения ПВ на объектах проводятся и за рубежом, хотя для анализа образцов помимо СЭМ может быть использован метод поляризационной микроскопии [30–34]. Важность использования метода СЭМ обусловлена специфичностью анализа именно для волокон, поскольку ни рентгеноструктурный анализ, ни ИК-спектроскопия и другие аналитические методы не способны оценить волокнистую морфологию (*рис. 1 и 2*).

Таким образом, предлагаемые методики обследования и анализа проб материалов и пыли позволяют ввести в отечественную гигиеническую практику новые подходы к проведению исследований на производственных и других объектах с целью выявления возможности воздействия промышленных волокон на работников и население.

В соответствии с п. 4.45 Постановления Правительства РФ от 16 ноября 2020 г. № 1847 «Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений» измерение массовой концентрации твёрдых веществ в пробах воздуха рабочей зоны должно быть обеспечено на уровне 0,5 ПДК с учётом пределов допускаемой погрешности измерений не более 25%. Для большинства аэрозо-

лей преимущественно фиброгенного действия (АПФД) для определения их содержания в воздухе рабочей зоны используют гравиметрический метод определения, который описан в Методических указаниях МУК 4.1.2468-09 «Измерение массовых концентраций пыли в воздухе рабочей зоны предприятий горнорудной и нерудной промышленности» (далее — МУК). Содержащая волокна пыль нормируется так же, как и АПФД, по общей массе пыли, что позволяет рассчитывать пылевую нагрузку и оценивать условия труда и риск развития профессиональных болезней. Это убедительно показано, в том числе, и на примере с асбестом [2]. Однако в упомянутых МУК диапазон измерений массовых концентраций пыли (1–250 мг/м³) не удовлетворяет требованиям указанного выше Постановления Правительства, поскольку для некоторых видов содержащей волокна пыли ПДК в воздухе рабочей зоны установлены на уровне не более 1 мг/м³⁸ [21]. Так, в п.п. 1846, 1849, 1850, 1852, 1859 СанПиН 1.2.3685-21 указаны среднесменные ПДК (ПДК_{с.с.}) для пыли ХА и амфиболовых асбестов, а также талька, вермикулита с примесями амфиболовых асбестов, волокнистых цеолитов (природных и искусственных) на уровне 0,1–0,5 мг/м³, а также максимально разовая ПДК (ПДК_{м.р.}) — на уровне 0,5 мг/м³. Для соответствия всем требованиям необходимо снизить нижний предел методики до уровня 0,05 мг/м³.

В этой связи необходимо отметить, что массовые концентрации пыли в воздухе рабочей зоны, определяемые гравиметрическим методом, рассчитываются по классической формуле, единой для такого рода измерений: масса навески, определяемая как разница между массой фильтра до отбора и после отбора (с пылью после экстрагирования масел), делится на объём воздуха, приведённый к стандартным условиям. Аналогичные методики имеются и за рубежом [35, 36]. Они позволяют проводить измерение общей массы всей витающей пыли (или вдыхаемой фракции пыли, практически аналогичный показатель, поскольку включает все частицы менее 100 мкм), с небольшими дополнениями в виде поправки на разницу массы пустого (чистого) фильтра до и после отбора. Учитывая принцип измерения, из этой формулы следует, что концентрация является расчётной величиной и нижний предел измерения метода зависит от количества отобранный пыли (массы навески), а также от объёма протянутого через фильтр воздуха, рассчитываемого путём умножения времени отбора и объёмного расхода пробоотборного оборудования. Вследствие этого для определения значений малых концентраций достаточно увеличить объём протянутого воздуха путём увеличения или объёмного расхода (но с учётом типа фильтров, которые имеют разные максимально допустимые значения объёмного расхода) или увеличить точность весов (но также с учётом достаточности навески для проведения измерений). Именно руководствуясь данными положениями, которые имеют не только метрологическое, но и гигиеническое значение, нами подготовлена новая редакция МУК 4.1.2468-09, где указано на возможности снижения нижнего предела измерений, причём в предыдущей редакции также имеются указания на данную возможность в п. 3. «Метод измерений»: «Нижний предел измерения массовой концентрации пыли в воздухе зависит от точности применяемых аналитических весов

⁸ Примечание: также и для некоторых других видов пыли, измеряемых данным методом, например, содержащий диоксид кремния более 70% и т. д.

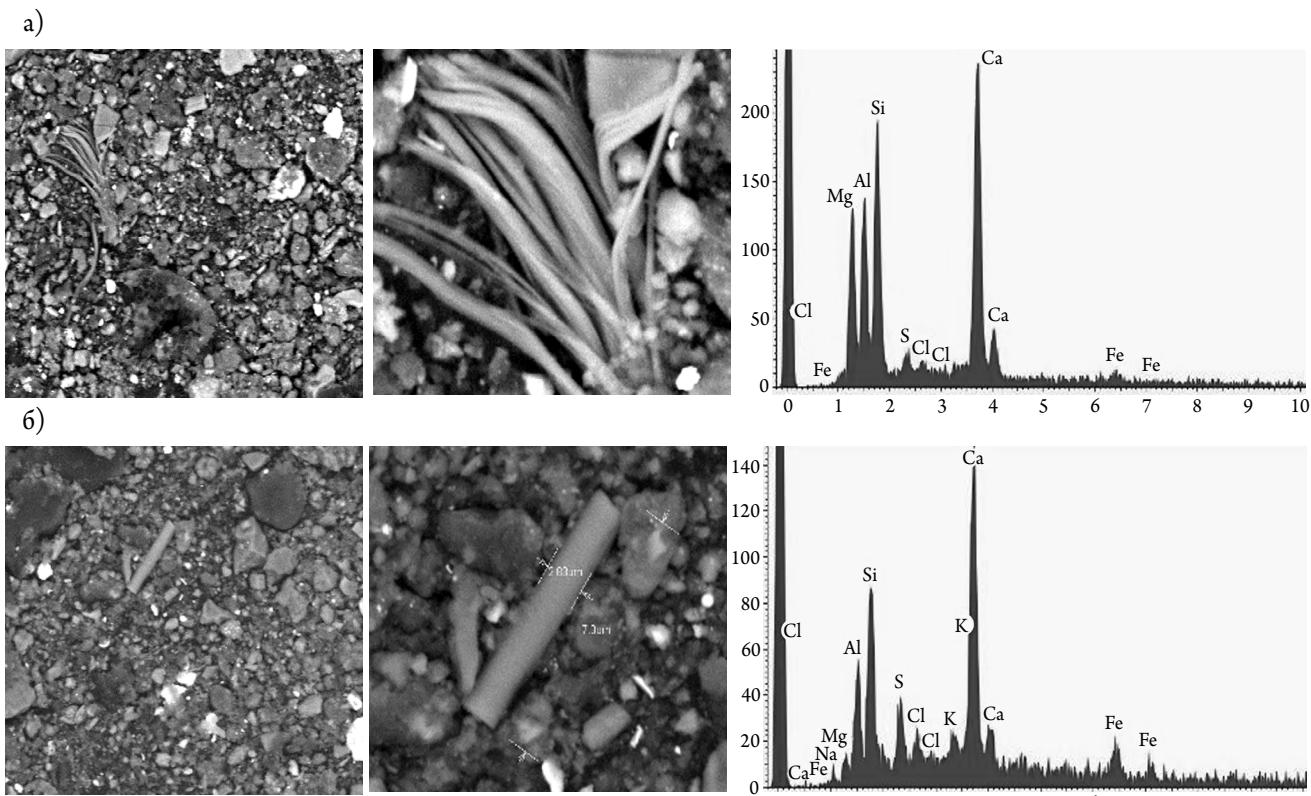


Рис. 1. Определение в 1 образце осевшей пыли пучка ХА (а) и ИМВ респираельного размера (б) на различных увеличениях:

а) электронное изображение пучка ХА ($\times 1000$ и $\times 7000$) и спектральный состав ($\times 7000$);

б) электронное изображение ИМВ ($\times 1000$ и $\times 5000$) и спектральный состав ($\times 5000$)

Fig. 1. Determination of the CA bundle (a) and MMMF of respirable size in sample 1 of settled dust (b) at various magnifications:

а) electronic image of the CA bundle ($\times 1000$ and $\times 7000$) and spectrum ($\times 7000$);

б) electronic image of MMMF ($\times 1000$ and $\times 5000$) and spectrum ($\times 5000$)

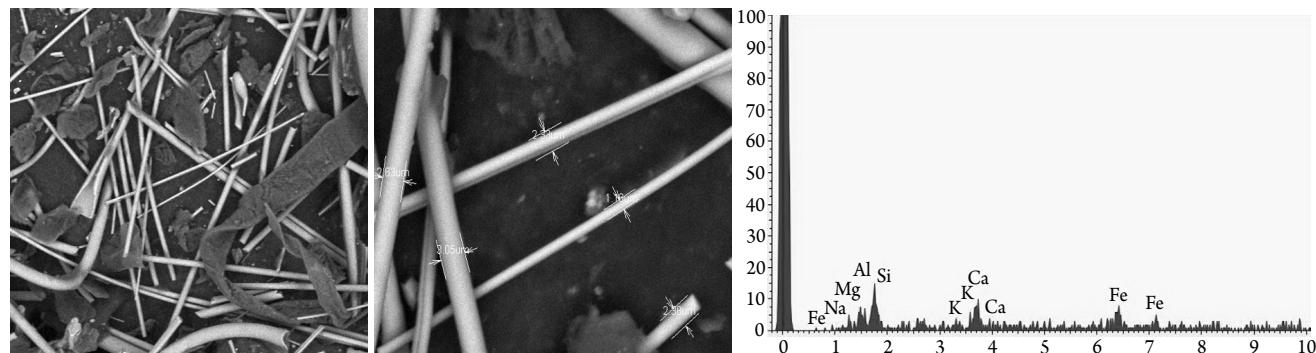


Рис. 2. Определение ИМВ в образце изоляционного материала, характерно высокое содержание респираельных волокон ($\times 1000$ и $\times 3000$, спектр — $\times 3000$)

Fig. 2. Determination of MMMF in an insulating material sample, characterized by a high content of respirable fibers ($\times 1000$ and $\times 3000$, spectrum — $\times 3000$)

($\pm 0,1$ мг) и от объема аспирируемого воздуха» (примечание авт.: вероятно, под точностью подразумевается такое понятие, как действительная цена деления (шкалы) d или дискретность — разность, выраженная в единицах массы, между двумя значениями, соответствующими двум соседним отметкам шкалы для аналоговой индикации или последовательными показаниями для цифровой индикации). Данный принцип аналогично отражён и в международной методике измерений вдыхаемой фракции пыли, где указано, что как предел обнаружения (Limit of detection, LOD), так и предел определения (Limit of quantification, LOQ,

ранее называвшийся нижней границей определяемых содержаний) зависят от объема отбираемого воздуха, чувствительности весов и стабильности веса среды, используемой для отбора проб. Однако следует отметить, что за рубежом для анализа используются микровесы с чувствительностью (дискретностью) 0,01–0,001 мг, что, на наш взгляд, заметно повышает требования к оборудованию и процедурам контроля различных метрологических параметров (рекомендуется использование международного стандарта ISO 15767:2009 «Workplace atmospheres — Controlling and characterizing uncertainty in weighing

collected aerosols»⁹). Также следует отметить, что объёмный расход воздуха в зарубежных методиках составляет, как правило, 1–2 л/мин (реже больше), поскольку данные методики рассчитаны на определение концентраций, близких к установленным гигиеническим нормативам (примерно 5–15 мг/м³)^{10,11}, в то же время в отечественной практике используют более высокие объёмные расходы воздуха для накопления необходимой навески пыли и сравнения с более низкими значениями ПДК. Это достигается за счёт использования фильтров АФА-ВП, состоящих из ткани Петрянова, обладающей высокими показателями фильтрующих свойств (стандартного гидродинамического сопротивления этих волокнистых материалов и их стандартного коэффициента фильтрации или фильтрующего действия [37]); к тому же отмечается в различных экспериментах, что с увеличением скорости фильтрации (прохождения воздуха) уменьшается размер частиц с максимальной проникающей способностью за счёт разных механизмов [37], аналогичная ситуация наблюдается с похожими фильтрами за рубежом [38]. Однако следует учитывать, что фильтры не должны перегружаться, чтобы не терять свою эффективность.

Определение содержания пыли в концентрациях ниже 1 мг/м³ гравиметрическим методом достигалось во многих исследованиях. Так, в крупномасштабном когортном исследовании смертности от рака среди работников предприятий по добыче и обогащению ХА представлены медианные дневные концентрации на различных производственных участках, полученные в ходе проведения различных международных проектов по изучению условий труда работников: так, на некоторых участках в 1995 г. они составили 0,24 и 0,50 мг/м³, при этом нижний предел значений достигал 0,1 мг/м³ (результаты получены путём проведения измерений 3 различными группами, применявшими разные национальные методики гравиметрического определения пыли, при этом результаты были сопоставимы друг с другом), в 2014 г. — 0,41–0,77 мг/м³ на различных участках в карьере и т. д. [16]. Средние концентрации пыли в различных точках отбора воздуха рабочей зоны цеха по производству теплоизоляционных материалов составляли менее 1 мг/м³ (0,53–0,70 мг/м³), при этом в некоторых местах минимальная концентрация составила 0,11–0,23 мг/м³ [39]. На предприятии по производству асбестоцементных изделий среднесменные концентрации пыли, содержащей ХА, также были ниже 1 мг/м³ (от 0,2 до 0,85 мг/м³) [40]. В исследовании по изучению условий труда асбестоцементных предприятий, где использовался ХА, для определения концентраций пыли использовались

⁹ Аналогичный ГОСТ Р ИСО 15767-2012 «Воздух рабочей зоны. Контроль и оценка неопределенности взвешивания проб аэрозолей».

¹⁰ Великобритания: ПДК общей массы вдыхаемой фракции пыли для некоторых веществ указаны в EH40/2005 Workplace exposure limits. [https://www.hseni.gov.uk/sites/hseni.gov.uk/files/EH40-2005%20\(2020\).pdf](https://www.hseni.gov.uk/sites/hseni.gov.uk/files/EH40-2005%20(2020).pdf)

¹¹ США: ПДК общей массы пыли для некоторых веществ представлено в таблицах Occupational Safety and Health Administration Permissible Exposure Limits — Annotated Tables. <https://www.osha.gov/annotated-pels/table-z-1>

весы, указанные в текущей версии МУК — ВЛР-200 (примечание: имеют высокую дискретность, но меньший класс точности по классификации ввиду погрешности): примерно на половине предприятий в большинстве профессий концентрации были ниже 1 мг/м³, при этом их значения находились в диапазоне от 0,2 до 1 мг/м³ [41]. При проведении погрузочно-разгрузочных работах и перевозке асбеста по железной дороге показано, что массовая концентрация может варьировать в диапазоне от 0,1–0,51 мг/м³ и 0,05–0,2 мг/м³ для данных операций соответственно, что ниже ПДК_{м.р.} для воздуха рабочей зоны и атмосферного воздуха в несколько раз [42].

В этой связи разработаны изменения в МУК 4.1.2468-09, включающие в себя: изменение названия, отражающего область применения («Методика измерений массовой концентрации промышленной пыли, включая аэрозоли преимущественно фиброгенного действия, в воздухе рабочей зоны гравиметрическим методом»), введение раздела «Характеристики веществ» (описание физико-химических свойств и биологического действия пыли, включая группу АПФД), внесение изменений в диапазон (без изменений метрологических характеристик), изменений в разделе оборудования и реагентов (указание надлежащим образом характеристик оборудования и реагентов), изменений в повествовании текста и исправление неточностей (например, терминов «точность», «погрешность» и т. д.), указание дополнительных материалов (например, приведение объёма воздуха к стандартным условиям), которые должны исправить несоответствие методики как метрологическим, так и гигиеническим положениям регулирующего законодательства.

В заключение следует подчеркнуть, что предлагаемые проекты взаимодополняющих методических документов направлены на:

- введение в гигиеническую практику стандартных методов измерений счётных концентраций ПВ, используемых во всём мире, с учётом положений гигиенического нормирования и проведения гигиенических исследований, принятых в отечественной практике;
- введение метода проведения обследования для выявления потенциальных источников выделения волокон, а также дополняющих его методов анализа материалов и пыли — т. е. методов обнаружения источника выделения и факта высвобождения волокон в воздухе, что позволяет получить более экономичный и практичный инструмент для оценки вероятности воздействия промышленных волокон и необходимости мониторинга состояния воздуха на предмет эмиссии высоких концентраций волокон;
- изменение методики гравиметрического измерения массовой концентрации для соответствия действующим отечественным нормативным актам.

Внедрение представленных методик позволит получить инструменты не только для контроля нормируемых в настоящем промышленных волокон, но и для внедряемых в будущем, в том числе нановолокон, а также проводить исследования для оценки эффективности профилактических мероприятий и действующих нормативов.

Список литературы (пп. 1, 3–14, 16, 22–36, 38 см. References)

2. Измеров Н.Ф., Домнин С.Г., Еловская А.Т., Милишникова В.В., Бурмистрова Т.Б., Ковалевский Е.В., Кашанский С.В. Мнение российской группы экспертов по проблеме тотального запрета асбеста. *Сборник последних публикаций по безопасности хризотил-асбеста и хризотилсодержащих материалов*. 2007; 109–134.
15. Цхомария И.М., Ковалевский Е.В. Потенциальные источники загрязнения воздуха промышленными волокнами. В кн.: «Материалы 16-го Российского Национального Конгресса с международным участием «Профессия и здоровье». М.; 2021: 560–565.
17. Ковалевский Е.В. Гигиеническая оценка использования асбестсодержащих фрикционных изделий. *Медицина труда и промышленная экология*. 2009; 7: 1–6. <https://elibrary.ru/jpjaxe>
18. Ковалевский Е.В. Оценка содержания природных и искусственных минеральных волокнистых частиц в воздухе объектов непроизводственного назначения. *Медицина труда и промышленная экология*. 2004; 1: 10–16. <https://elibrary.ru/ovwssl>
19. Цхомария И.М., Ковалевский Е.В., Кашанский С.В. Природно-антропогенные источники загрязнения атмосферного воздуха волокнами асбеста. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(3): 294–302 <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-3-294-302> <https://elibrary.ru/ciyoqc>
20. Цхомария И.М., Ковалевский Е.В. Оценка возможности загрязнения воздуха волокнами асбеста при эксплуатации дорожных покрытий, содержащих стабилизирующие асбестсодержащие добавки. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(2): 146–152. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-2-146-152> <https://elibrary.ru/ugjpf>
21. СанПин 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
27. Басманов П.И. и др. *Высокоэффективная очистка газов от аэрозолей фильтрами Петрянова*. М.: Наука; 2003.
39. Гутич Е.А. Комплексная гигиеническая оценка пылевого фактора в производстве теплоизоляционных строительных изделий на основе искусственных минеральных волокон. *Медицина труда и промышленная экология*. 2021; 61(2): 77–83. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-2-77-83> <https://elibrary.ru/fytrwzh>
40. Гутич Е.А. Комплексная гигиеническая оценка пылевого фактора в производстве асбестоцементных изделий. *Проблемы здоровья и экологии*. 2021; 18(2): 119–125. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2021-18-2-17>
41. Кундиев Ю.И. и др. Гигиеническая характеристика условий труда рабочих основных профессий в асбестоцементном производстве Украины. *Медицина труда и промышленная экология*. 2008; 3: 21–27. <https://elibrary.ru/khpbzv>
42. Белошайкин В.А., Кашанский С.В., Чащина Г.В., Ковалевский Е.В. Эколо-гигиеническая оценка элиминации волокон хризотил-асбеста при погрузочно-разгрузочных работах и перевозке по железной дороге. *Медицина труда и промышленная экология*. 2011; 5: 41–44. <https://elibrary.ru/nulodn>

References

1. Donaldson K., et al. Asbestos, carbon nanotubes and the pleural mesothelium: a review of the hypothesis regarding the role of long fibre retention in the parietal pleura, inflammation and mesothelioma. *Particle and fibre toxicology*. 2010; 7(1): 5. <https://doi.org/10.1186/1743-8977-7-5>
2. Izmerov N.F., Domnin S.G., Yelovskaya L.T., Milishnikova V.V., Burmistrova T.B., Kovalevsky E.V., Kashansky S.V. Opinion of the Russian group of experts on the problem of total prohibition of asbestos. *A collection of recent publications on the safety of chrysotile asbestos and chrysotile-containing materials*. 2007; 109–134.
3. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *Arsenic, metals, fibres, and dusts. IARC Monogr. Eval. Carcinog. Risks Hum.* 2012; 100(Pt C): 11–465.
4. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *Man-made vitreous fibres. IARC Monogr. Eval. Carcinog. Risks Hum.* 2002; 81: 1–381.
5. Wardenbach P., Rödelsperger K., Roller M., Muhle H. Classification of man-made vitreous fibers: Comments on the revaluation by an IARC working group. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2005; 43(2): 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2005.06.011>
6. World Health Organization. *WHO Workshop on Mechanisms of Fibre Carcinogenesis and Assessment of Chrysotile Asbestos Substitutes 8–12 November 2005, Lyon, France*. 2005.
7. Regulation (EC) No 1272/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures, amending and repealing Directive 67/548/EEC and 1999/45/EC, and amending Regulation (EC) No 1907/2006. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A32008R1272>
8. Berrigan D. Respiratory cancer and exposure to man-made vitreous fibers: A systematic review. *American Journal of Industrial Medicine*. 2002; 42(4): 354–362. <https://doi.org/10.1002/ajim.10111>
9. Lipworth L., La Vecchia C., Bosetti C., McLaughlin J.K. Occupational Exposure to Rock Wool and Glass Wool and Risk of Cancers of the Lung and the Head and Neck: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2009; 51(9): 1075–1087. <https://doi.org/10.1097/jom.0b013e3181b35125>
10. Jolanki R., Makinen I., Suuronen K., Alanko K., Estlander T. Occupational irritant contact dermatitis from synthetic mineral fibres according to Finnish statistics. *Contact Dermatitis*. 2002; 47(6): 329–333. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0536.2002.470602.x>
11. Lundgren L., Moberg C., Liden C. Do insulation products of man-made vitreous fibres still cause skin discomfort? *Contact dermatitis*. 2014; 70(6): 351–360. <https://doi.org/10.1111/cod.12178>
12. Kilburn K.H., Powers D., Warshaw R.H. Pulmonary effects of exposure to fine fibreglass: irregular opacities and small airways obstruction. *Occupational and Environmental Medicine*. 1992; 49(10): 714–720.
13. Drent M., Bomans P.H.H., Van Suylen R.J., Lamers R.J.S., Bast A., Wouters E.F.M. Association of man-made mineral fibre exposure and sarcoidlike granulomas. *Respiratory medicine*. 2000; 94(8): 815–820.
14. Walton W.H. Part 5. Summary, discussion and conclusions etc. *The Annals of Occupational Hygiene*. 1982; 25(2): 229–239. <https://doi.org/10.1093/annhyg/25.2.229>
15. Цхомария И.М., Kovalevsky E.V. Potential sources of air pollution by industrial fibers. In: *Materials of the 16th Russian National Congress with international participation «Occupation and Health»*. М.; 2021: 560–565.
16. Feletto E., Schonfeld S.J., Kovalevskiy E.V., Bukhtiyarov I.V. et al. A comparison of parallel dust and fibre measurements of airborne chrysotile asbestos in a large mine and processing factories in the Russian Federation. *International journal of hygiene and environmental health*. 2017; 220(5): 857–868. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2017.04.001>
17. Kovalevskiy E.V. Hygienic evaluation of asbestos-containing friction goods application. *Med. truda i prom. ekol.* 2009; 7: 1–6 <https://elibrary.ru/jpxseu> (in Russian).

18. Kovalevsky E.V. Measuring natural and artificial mineral fiber particles in air of civil objects. *Med. truda i prom. ekol.* 2004; 1: 10–16 <https://elibrary.ru/ovwssl> (in Russian).
19. Tskhomariia I.M., Kovalevskiy E.V., Kashanskiy S.V. Natural and anthropogenic sources of atmospheric air pollution by asbestos fibers. *Gigiena i sanitariya.* 2022; 101(3): 294–302 <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-3-294-302> <https://elibrary.ru/ciyoqc> (in Russian).
20. Tskhomariia I.M., Kovalevskiy E.V. Assessment of the possibility of air pollution by asbestos fibres during the operation of road surfaces containing stabilizing asbestos-containing additives. *Gigiena i sanitariya.* 2022; 101(2): 146–152 <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-2-146-152> <https://elibrary.ru/ugjpfc> (in Russian).
21. Sanitary Rules And Normatives 1.2.3685-21 «Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and(or) harmlessness of environmental factors for humans».
22. Tossavainen A. et al. Health and exposure surveillance of Siberian asbestos miners: A joint Finnish-American-Russian project. *American journal of industrial medicine.* 1999; 36(1): 142–144.
23. Spurny K.R. Sampling, analysis, identification and monitoring of fibrous dusts and aerosols. *The Analyst.* 1994; 119(1): 41. <https://doi.org/10.1039/ann941900041>
24. Ervik T.K., Hammer S.E., Skaugset N.P., Graff P. Measurements of airborne asbestos fibres during refurbishing. *Annals of Work Exposures and Health.* 2023; 67 (8): 952–964. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxad041>
25. Lee R.J., Van Orden D.R. Airborne asbestos in buildings. *Regulatory Toxicology and Pharmacology.* 2008; 50(2): 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2007.10.005>
26. Shuker L. (ed.). *Fibrous Materials in the Environment: A Review of Asbestos and Man-made Mineral Fibres;* 1997.
27. Carter C.M., Axtен C.W., Byers C.D., Chase G.R., Koenig A.R., Reynolds J. W., Rosinski K. D. Indoor Airborne Fiber Levels of MMVF in Residential and Commercial Buildings. *American Industrial Hygiene Association Journal.* 1999; 60(6): 794–800. [doi:10.1080/00028899908984504](https://doi.org/10.1080/00028899908984504)
28. Bruno Maria R., et al. Airborne asbestos fiber concentration in buildings: Surveys carried out in latium (central Italy). *Minerals.* 2023; 13(2): 233. <https://doi.org/10.3390/min13020233>
29. Kevin K., Lloyd G. A comparison of the risks from different materials containing asbestos. *Health and Safety Commission Paper HSC/06/55.* Health and Safety Commission. 4 July 2006
30. Zhang Y.L. et al. Risk assessment of asbestos containing materials in a deteriorated dwelling area using four different methods. *Journal of Hazardous Materials.* 2021; 410: 124645. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124645>
31. Nam I.S. et al. Comparison of risk assessment criteria and distribution of asbestos-containing materials in school building. *International Journal of Environmental Research.* 2015; 9(4): 1341–1350.
32. Dündar-Mustafa D. The use of asbestos as a construction material in public buildings: a case study. Master's thesis. Middle East Technical University. 2020.
33. Lowers H., Meeker G.P. *Particle Atlas of World Trade Center Dust. No. 2005–1165.* 2005. <https://pubs.usgs.gov/of/2005/1165/508OF05-1165.html>
34. Salonen H.J., Lappalainen S. K., Riuttala H.M., Tossavainen A.P., Pasanen P.O., Reijula K.E. Man-Made Vitreous Fibers in Office Buildings in the Helsinki Area. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene.* 2009; 6(10): 624–631. <https://doi.org/10.1080/15459620903133667>
35. National Institutes of Health et al. *Particulates not otherwise regulated, total-method: 0501, Issue 1.* 2015.
36. Health and Safety Executive. *General methods for sampling and gravimetric analysis of respirable, thoracic and inhalable aerosols. Methods for Determining Hazardous Substances (MDHS 14/4).* 2014.
37. Basmanov P.I. et al. *Highly efficient purification of gases from aerosols by Petryanov filters.* M.: Nauka; 2003.
38. Soo J.C., Monaghan K., Lee T., Kashon M., Harper M. Air sampling filtration media: Collection efficiency for respirable size-selective sampling. *Aerosol Science and Technology.* 2016; 50(1): 76–87.
39. Hutsch K.A. Comprehensive hygienic assessment of the dust factor in the manufacturing heat-insulating building products from man-made mineral fibers. *Med. truda i prom. ekol.* 2021; 61(2): 77–83 <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-2-77-83> <https://elibrary.ru/fyrvzh> (in Russian).
40. Hutsch K.A. Comprehensive hygienic assessment of the dust factor in the asbestos cement manufacturing industry. *Health and Ecology Issues.* 2021; 18(2): 119–125 <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2021-18-2-17> (in Russian).
41. Kundiev Yu.I. Hygienic characteristics of the working conditions of workers of the main professions in the asbestos cement industry of Ukraine. *Med. truda i prom. ekol.* 2008; 3: 21–27. <https://elibrary.ru/khpbzv>
42. Belosheikin V.A., Kashansky S.V., Tchashina G.V., Kovalevsky E.V. Ecologic and hygienic evaluation of chrysotile asbestos fibers elimination in cargo handling and transportation on railways. *Med. truda i prom. ekol.* 2011; 5: 41–44. <https://elibrary.ru/nulodn>

Сведения об авторах:

- Цхомария Ираклий Мамукович** научный сотрудник ФГБНУ «НИИ МТ». *E-mail:* iraklytchomariya@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-9615-3284>
- Ковалевский Евгений Вильевич** главный научный сотрудник ФГБНУ «НИИ МТ»; профессор кафедры медицины труда авиационной, космической и водолазной медицины ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский Университет), д-р мед. наук, профессор РАН. *E-mail:* kovevgeny2008@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-5166-6871>
- Федорук Анна Алексеевна** зав. отделом медицины труда, ведущий научный сотрудник ФБУН «Екатеринбургский медицинский-научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора, канд. мед. наук. *E-mail:* annaf@ymrc.ru <https://orcid.org/0000-0002-6354-0827>
- Другова Ольга Геннадьевна** старший научный сотрудник отдела медицины труда ФБУН «Екатеринбургский медицинский-научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора, канд. биол. наук. *E-mail:* drugovao@ymrc.ru <https://orcid.org/0000-0001-5491-3209>

About the authors:

Iraklii M. Tskhomaria

Researcher, Izmerov Research Institute of Occupational Health.

E-mail: iraklytchomariya@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-9615-3284

Evgeny V. Kovalevskiy

Chief Researcher, Izmerov Research Institute of Occupational Health; Professor of the Department for Occupational Medicine, Aviation, Space and Diving Medicine, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Professor of the RAS, Dr. of Sci. (Med.).

E-mail: kovevgeny2008@yandex.ru

https://orcid.org/0000-0001-5166-6871

Anna A. Fedoruk

Head of the Department of Occupational Medicine, Leading Researcher at the Federal Ekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection of Industrial Workers, Cand. of Sci. (Med.).

E-mail: annaf@ymrc.ru

https://orcid.org/0000-0002-6354-0827

Olga G. Drugova

Senior Researcher, Department of Occupational Medicine, Federal Ekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health protection Of Industrial Workers, Cand. of Sci. (Biol.).

E-mail: drugovao@ymrc.ru

https://orcid.org/0000-0001-5491-3209