

УДК 544.02+614.7

DOI: 10.15372/KhUR2022406

EDN: JZJOGK

## Физико-химические характеристики образцов пыли медицинской организации города Кемерово

О. С. ЕФИМОВА, Р. П. КОЛМЫКОВ, В. Ю. МАЛЫШЕВА, З. Р. ИСМАГИЛОВ

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,  
Кемерово (Россия)

E-mail: efimovaos@mail.ru

### Аннотация

Проблема влияния загрязнения частицам пыли от угольной и углеперерабатывающей промышленности на здоровье населения чрезвычайно остра для Кемеровской области, где зафиксирован высокий уровень сердечно-сосудистых заболеваний. Одним из первых шагов для выявления связи заболеваемости и типов загрязнителей служит исследование физико-химических свойств пыли, отобранной в медицинских стационарах города Кемерово (Кемеровская область – Кузбасс), что было выполнено в работе. Установлено, что объект анализа имеет смешанный тип, неоднороден, содержит органическую и неорганическую составляющую. Большая часть минеральной компоненты представлена кремнием, что согласуется с его содержанием в золах уноса, типичных для региона. Постоянное соотношение концентраций кремния, алюминия и марганца позволяет предполагать, что исследуемые пробы пыли состоят из алюмосиликатов схожего состава, содержащих в своей структуре марганец. Низкое количество серы и высокое – кальция свидетельствует о том, что существенную долю образцов составляет кальцит и/или полевой шпат. Высокое содержание натрия и калия может быть вызвано применением моющих средств. По размерам частиц пыль классифицирована как  $PM_{0.1}$ – $PM_{1.1}$ . Намечена взаимосвязь свойств пыли с особенностями промышленной ориентации региона.

**Ключевые слова:** медицинская пыль, вентиляционная пыль, динамическое рассеяние света, ИК-спектроскопия, оптико-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой

### ВВЕДЕНИЕ

Взвешенные частицы (РМ) представляют собой широко распространенный загрязнитель атмосферного воздуха, включающий смесь твердых и жидких частиц, находящихся в воздухе во взвешенном состоянии и представляющих серьезную угрозу для здоровья человека и экосистем [1]. Наиболее распространенные химические компоненты РМ – это сульфат-, нитрат-, хлорид-ионы, ионы натрия, калия, кальция, магния, аммиак, органический и элементарный углерод, минералы земной коры, связанная частицами вода, металлы и полициклические ароматические углеводороды [2]. В составе РМ также встречаются биологические объекты, на-

пример: вирусы, бактерии, пыльца, белковые фрагменты и др. [3, 4].

В атмосферном воздухе угледобывающих регионов, подобных Кемеровской области, присутствует большое количество угольной пыли, которая образуется на всех этапах угледобычи и углепереработки. Это один из важных факторов, обуславливающих развитие генотоксических эффектов, причем наибольшую опасность представляют мелкодисперсная пыль и наноразмерные частицы [5–7]. Мелкодисперсные частицы являются фактором риска развития заболеваний дыхательной и сердечно-сосудистой систем; описан патогенез повреждающего действия клеток наночастицами с последующим развитием системных реакций [8]. При исследо-

вании влияния пылевого загрязнения различного характера на окружающую среду и здоровье человека важно рассмотреть особенности такого загрязнения в зависимости от его источника [9]. Например, образование и свойства пыли в медицинской организации зависят как от загрязнений атмосферного воздуха, так и от характера применяемых медицинских технологий и материалов [10].

Цель данной работы – определение физико-химических характеристик пыли медицинской организации для последующего установления закономерностей ее влияния на здоровье пациентов.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Пробы пыли были отобраны в медицинском учреждении города Кемерово (Кемеровская область – Кузбасс) в стерильные емкости стерильной перчаткой с внутренней стороны вентиляционных решеток и непосредственно прилежащих к ним частей воздуховодов вытяжных вентиляционных систем. В исследование включены пробы из взрослого (образец 1) и детского отделений (образец 2).

Химический состав неорганической части образцов пыли определяли методом оптико-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и лазерным пробоотбором при помощи спектрометра iCAP 6500 DUO (Thermo Scientific, США) и лазерного аблятора UP 266 Macro (Thermo Scientific, США). Для определения элементного состава использовали методику, разработанную на основе ГОСТ Р 54237-2010 “Определение химического состава золы методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой” [11] и модифицированную для лазерного пробоотбора. Навески предварительно подготовленных образцов смешивали в равных количествах со связующим, в качестве которого использовали микрокристаллическую целлюлозу. Далее образцы подвергали одноосному прессованию при давлении 160 МПа. Полученные компакты использовались для проведения лазерного пробоотбора. Все этапы пробоподготовки исследуемых и стандартных образцов идентичны. В качестве образцов сравнения применяли стандартные образцы производства Института геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН (Иркутск): СГД-2А (ГСО 8670-2005), ЗУК-1 (ГСО 7125-94), СГ-1А (ГСО 520-84П), СГ-3 (ГСО 3333-85).

Химический состав органической части образцов (определение содержания углерода, водорода, азота и серы) выполнен методом высокотемпературного каталитического окисления с помощью элементного анализатора Flash 2000 (Thermo Scientific, США) с использованием реактора, заполненного CuO/Cu. Содержание кислорода определяли на том же анализаторе с использованием реактора, наполненного Ni/C с методике [12, 13]. Результаты элементного анализа были рассчитаны по трем параллельным измерениям.

ИК-спектры регистрировали с помощью ИК-Фурье спектрометра “Инфралюм ФТ-08” (НПО “Люмекс”, Россия) в диапазоне  $370\text{--}4000\text{ см}^{-1}$  с разрешением спектра  $4\text{ см}^{-1}$ . Коррекцию базовой линии проводили в программе “Спектра-Люм”, а обработку спектров – в программе Origin 8.0. Образцы пыли были подготовлены в виде таблетки с бромидом калия (соотношение 1 : 50) прессованием при давлении 8 МПа в пресс-форме.

Анализ дисперсного состава медицинской пыли в нанометровом диапазоне осуществляли методом динамического рассеяния света с помощью лазерного анализатора Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments, Великобритания). Перед проведением съемки исследуемые частицы были ресуспендированы в деионизованной воде и обработаны ультразвуком в течение 20 мин до получения устойчивых коллоидных растворов, далее фильтрованием через шприцевые мембранные насадки диаметром пор 450 нм удалены крупные частицы. Для каждого образца выполнено от 10 до 50 измерений до получения не менее 5 сходящихся результатов при  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; время термостатирования пробы 20 мин в соответствии с методикой исследования наночастиц пыли в снеговой воде [14, 15].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Химический состав

Химический состав образцов пыли довольно сложен и представлен минеральной и органической частями: в образце 1 – 28.9 мас. % минеральной части и 71.1 мас. % органической, в образце 2 – 22.5 и 77.5 % соответственно.

Неорганическая часть пыли состоит в основном из соединений кремния, натрия, кальция, алюминия, калия и железа (табл. 1), что согласуется с [12].

ТАБЛИЦА 1

Химический состав неорганической части образцов пыли и стандартных образцов

| Соединение                                    | Содержание, мас. % |             |             |             |
|-----------------------------------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|
|                                               | Образец 1          | Образец 2   | ГСО 7125-94 | ГСО 3483-86 |
| SiO <sub>2</sub>                              | 30.7±1.3           | 40.1±0.3    | 35.8        | 45.59       |
| Na <sub>2</sub> O                             | 24.0±1.0           | 12.0±0.3    | 0.22        | 0.87        |
| CaO                                           | 15.8±0.3           | 15.02±0.27  | 20.91       | 7.05        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                | 10.6±0.4           | 15.03±0.09  | 6.79        | 11.60       |
| K <sub>2</sub> O                              | 8.8±0.6            | 10.0±0.3    | 0.51        | 2.96        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>общ</sup> | 3.86±0.16          | 3.43±0.07   | 6.28        | 4.62        |
| MgO                                           | 3.57±0.12          | 2.11±0.02   | 6.70        | 5.82        |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                 | 0.209±0.016        | 0.026±0.003 | 0.059       | 0.15        |
| S <sup>общ</sup>                              | 1.31±0.21          | 1.41±0.17   | 1.70        | 0.05        |
| TiO <sub>2</sub>                              | 1.05±0.05          | 0.70±0.02   | 0.35        | 0.63        |
| MnO                                           | 0.074±0.003        | 0.083±0.005 | 0.09        | 0.07        |

Большая часть минеральной массы представлена оксидом кремния, который составляет 30–41 мас. %, что находится на уровне его содержания в золе уноса [16]. В образцах обнаружена высокая концентрация соединений натрия (12–24 мас. %) и калия (8–10 мас. %), что может быть связано с интенсивным использованием моющих и дезинфицирующих средств в медицинских помещениях.

Оксид кальция представлен практически одинаково в обоих образцах в количестве около 15 мас. %. При таких высоких содержаниях кальция и низких концентрациях серы (1.3–1.4 мас. %), кальций может находиться в виде кальцита или полевого шпата [17]. Кроме того, для исследуемых образцов (см. табл. 1) установлено сопоставимое соотношение алюминий/кремний, что говорит о возможном наличии алюмосиликатов приблизительно одинакового состава. Для соотношения кальций/кремний подобной тенденции не обнаружено. Это позволяет предполагать, что большая его часть находится в образце в виде кальцита. Единственным элементом, сохраняющим постоянное соотношение с алюминием и кремнием, является марганец, что

может быть признаком его полного внедрения в структуру алюмосиликатов.

В образце 1 обнаружено большее количество серы по отношению к основным компонентам – алюминию и кремнию, а также больше фосфора, кальция и натрия (см. табл. 1). Очевидно, что образец 1 содержит меньшее валовое количество алюмосиликатов за счет наличия высоких концентраций загрязнений [12, 14]. Все элементы, которые в больших количествах представлены в образце 1 по сравнению с образцом 2 могут частично иметь органическую природу, т. е. относиться к человеческой жизнедеятельности, а именно, представлять из себя остатки волос, кожи и т. п.

При сравнении полученных результатов с показателями стандартных образцов [16] установлено, что элементный состав образца 2 близок к составу карбонатно-силикатного стандарта (ГСО 3483-86) и золы уноса КАТЭКа (ГСО 7125-94) (см. табл. 1). Первый образец представляет собой осадочную породу, а второй – тонкодисперсный остаток сгорания топлива, содержащийся в дымовом газе во взвешенном состоянии и способный перемещаться по воздуху на значительные расстояния, а также попадать в вентиляционные системы учреждений. Поскольку Кемеровская область является промышленной и угледобывающей территорией, представляется логичным, что минеральная часть исследуемой пыли состоит из комбинации осадочных пород и золы уноса, образовавшейся от сжигания угля.

Органическая часть образцов представлена преимущественно углеродом (48.8–49.7 мас. %) и кислородом (35.4–38.3 мас. %), а также водородом, азотом и серой (табл. 2). Образцы характе-

ТАБЛИЦА 2

Химический состав органической части образцов пыли

| Элемент | Содержание, мас. % |           |            |
|---------|--------------------|-----------|------------|
|         | Образец 1          | Образец 2 | Белки [18] |
| C       | 48.8±0.9           | 49.7±1.3  | 50.0–54.4  |
| O       | 35.4±1.2           | 38.3±1.1  | 21.5–23.5  |
| N       | 7.9±0.3            | 4.4±0.2   | 15–17      |
| H       | 6.8±0.3            | 6.7±0.3   | 6.5–7.3    |
| S       | 1.1±0.1            | 0.9±0.1   | 0.3–2.5    |

ризуются схожим составом, однако по сравнению с образцом 1 в образце 2 несколько выше содержание кислорода (38.3 против 35.4 мас. %) и практически вдвое ниже содержание азота (4.4 против 7.9 мас. %). Качественные и количественные характеристики органической части образцов схожи с характеристиками белка, что согласуется с данными ИК-Фурье спектроскопии.

Углерод, определяемый методом высокотемпературного окисления, включает в себя органический и элементарный углерод, находящийся в атмосфере в виде взвешенных частиц, а также “живой” углерод, попавший в пыль медицинских учреждений в виде микроорганизмов и объектов жизнедеятельности человека [3, 19].

### ИК-спектроскопия

ИК-спектры исследованных образцов пыли имеют схожий вид, но различаются по интенсивности некоторых полос (рис. 1).

В спектрах наблюдаются полосы, характерные для колебаний связей кремния и алюминия в минеральных соединениях: Si-O – в оксиде кремния, Si-O-Si – в силикатах, Al-O – в оксиде алюминия; а также полосы, характер-

ные для органических соединений (в частности, белков и полинуклеотидов): N-H, S-H и S-S – в белках, CH<sub>2</sub> и CH<sub>3</sub> – в алифатических соединениях, C=O – в карбоксильной группе и др. (табл. 3).

### Динамическое рассеяние света

Исследованные фракции медицинской пыли нанометрового диапазона представляют собой полидисперсные системы, характеризующиеся широким распределением частиц по размерам в двух областях – в интервале 60–150 и 150–500 нм, причем в образце 1 эти области имеют более узкий вид и изолированы друг от друга, а в образце 2 – граничат между собой (рис. 2).

В образце 1 область малых размеров находится в пределах 60–100 нм с максимумом 80.7 нм и составляет 7.1 % от общей площади пиков (табл. 4). Область более крупных частиц приходится на 200–500 нм с максимумом 302.1 нм.

В образце 2 область малых размеров чуть сдвинута, начинаясь после 70 нм и заканчиваясь приблизительно при 150 нм, имеет максимум при 102.4 нм и составляет 10.7 % от сум-

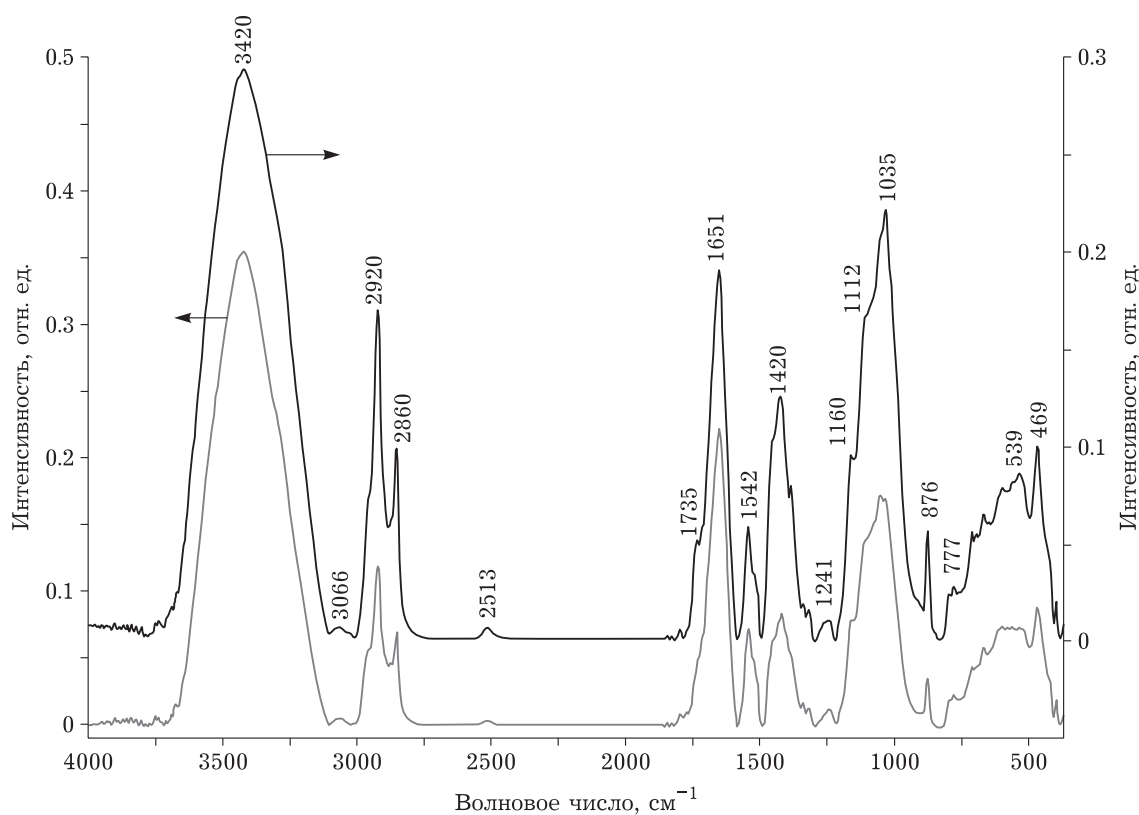


Рис. 1. ИК-Фурье спектры образцов пыли 1 и 2.

ТАБЛИЦА 3

Отнесение полос характеристичных колебаний в исследуемых образцах в соответствии с [20, 21]

| Волновое<br>число, $\text{см}^{-1}$ | Тип колебания                                                                       | Интенсивность<br>колебания |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 3420                                | Валентное колебание О–Н-группы, связанной водородной связью                         | Сильная                    |
| 3066                                | Валентное колебание N–H-группы в молекуле белков                                    | Слабая                     |
| 2920                                | Валентное асимметричное колебание $\text{CH}_2$ -группы в алифатических соединениях | Сильная                    |
| 2860                                | Валентное симметричное колебание $\text{CH}_3$ -группы в алифатических соединениях  | Сильная                    |
| 2513                                | Валентное колебания группы S–H в белках                                             | Слабая                     |
| 1735                                | Валентное колебание C=O в карбоксильной группе                                      | Плечо                      |
| 1651                                | Валентное колебание C=O и C–N в амидах                                              | Сильная                    |
| 1542                                | Деформационное колебание связи N–H амидной группы                                   | Средняя                    |
| 1420                                | Деформационное колебание $\text{CH}_2$ -групп в алифатических соединениях           | Средняя                    |
| 1241                                | Валентное ассиметричное колебание связи P–O–R полинуклеотида                        | Слабая                     |
| 1160                                | Валентное колебание группы C–O–C                                                    | Плечо                      |
| 1112                                | Валентное колебание связи Si–O в оксиде                                             | Плечо                      |
| 1035                                | Асимметричное валентное колебание группы Si–O–Si в силикатах                        | Сильная                    |
| 876                                 | Валентное колебание связи Al–O                                                      | Средняя                    |
| 777                                 | Валентное колебание связи P–O в $\text{PO}_4$ -группе полинуклеотида                | Слабая                     |
| 539                                 | Валентное колебание связи S–S в белковых структурах                                 | Средняя                    |
| 469                                 | Симметричные валентные колебания группы Si–O–Si в силикатах                         | Средняя                    |

марной площади пиков, что немного больше, чем в образце 1. Область более крупных частиц начинается сразу после 150 нм и завершается также частицами размером 500 нм с максимумом размера при 267.9 нм.

Таким образом, образец 1 отличается наличием частиц меньшего размера (80.7 нм против 102.4 нм у образца 2) и более узким их распределением в области малых размеров. При этом оба образца характеризуются наличием частиц

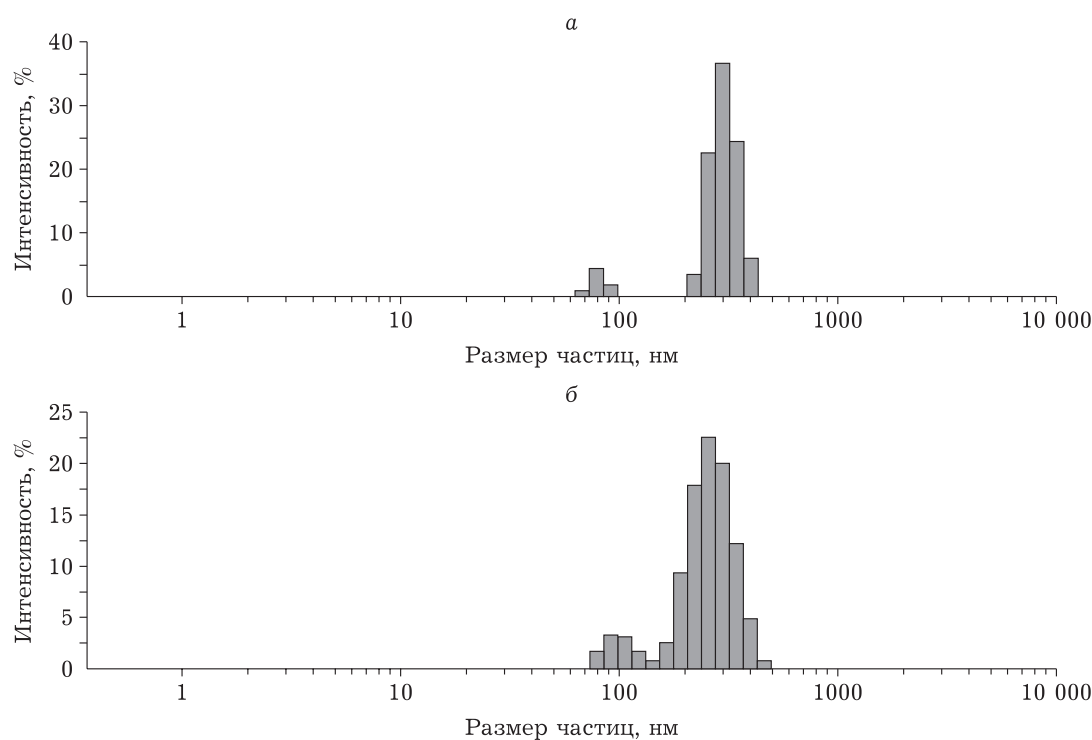


Рис. 2. Гистограммы распределения частиц пыли по размерам: образцы 1 (а) и 2 (б).

ТАБЛИЦА 4

Характеристики размеров частиц пыли нанометрового диапазона, определенные методом динамического рассеяния света

| Образец | Размер частиц, нм | Относительная площадь пика, % |
|---------|-------------------|-------------------------------|
| 1       | 80.7±7.1          | 7.1                           |
|         | 302.1±42.9        | 92.9                          |
| 2       | 102.4±17.5        | 10.7                          |
|         | 267.9±60.1        | 89.3                          |

с размерами менее 1 мкм ( $PM_{10}$ ) и даже менее 100 нм ( $PM_{0.1}$ ) [1, 22].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексом физико-химических методов установлено, что пыль медицинской организации города Кемерово относится к смешанному типу, является неоднородной, содержит органическую и неорганическую составляющую, а также различается химическим составом.

Минеральная часть представлена в основном соединениями кремния, натрия, кальция, алюминия, калия и железа. Повышенное количество соединений натрия и калия по сравнению с осадочными породами и золами уноса может быть связано с интенсивным использованием моющих и дезинфицирующих средств в медицинских помещениях. В остальном химический состав неорганической части медицинской пыли близок к составу зол уноса и осадочных пород.

Методом динамического рассеяния света наряду с токсичными частицами  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$  детектирована наиболее мелкая и токсичная фракция пыли  $PM_{0.1}$  (ультрамелкие частицы).

Работа выполнена в рамках государственного задания Института углехимии и химического материаловедения ФИЦ УУХ СО РАН по проекту № 121031500512-7 с использованием оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ УУХ СО РАН.

Авторы выражают благодарность за предоставление образцов пыли сотрудникам Кемеровского государственного медицинского университета: д. м. н., профессору Брусиной Е. Б. и аспиранту Шишкиной Е. А.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 WHO global air quality guidelines: Particulate matter ( $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$ ), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization, 2021 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329> (дата обращения: 08.10.2021).

- 2 Ивлев Л. С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 365 с.
- 3 Després V. R., Huffman J. A., Burrows S. M., Hoose C., Safatov A. S., Buryak G., Fröhlich-Nowoisky J., Elbert W., Andreae M. O., Pöschl U., Jaenicke R. Primary biological aerosol particles in the atmosphere: A review // *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.* 2012. Vol. 64, No. 1. Art. 15598.
- 4 Калаева С. З., Чистяков Я. В., Муратова К. М., Чеботарев П. В. Влияние мелкодисперсной пыли на биосферу и человека // *Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле.* 2016. № 3. С. 40–63.
- 5 Mannucci P. M., Harari S., Martinelli I., Franchini M. Effects on health of air pollution: A narrative review // *Internal and Emergency Medicine.* 2015. Vol. 10, No. 6. С. 657–662.
- 6 Чезганова Е. А., Ефимова О. С., Сахарова В. М., Ефимова А. Р., Созинов С. А., Исмагилов З. Р., Брусина Е. В. Дополнительный резервуар госпитальных микроорганизмов в медицинских организациях // *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии.* 2021. Т. 98, № 3. С. 266–275.
- 7 Chezganova E., Efimova O., Sakharova V., Efimova A., Sozinov S., Kutikhin A., Ismagilov Z., Brusina E. Ventilation-associated particulate matter is a potential reservoir of multidrug-resistant organisms in health facilities // *Life.* 2021. Vol. 11, No. 7. Art. 639.
- 8 Кутихин А. Г., Ефимова О. С., Исмагилов З. Р., Барбараш О. Л. Влияние пылевого загрязнения от угольной и углехимической промышленности на риск развития сердечно-сосудистых заболеваний // *Химия уст. разв.* 2018. Т. 26, № 6. С. 647–655.
- 9 Савченко Я. А., Минина В. И., Баканова М. Л., Глушков А. Н. Генотоксичные и канцерогенные эффекты воздействия факторов производственной среды угледобывающей и углеперерабатывающей индустрии // *Генетика.* 2019. Т. 55, № 6. С. 643–654.
- 10 Baurès E., Blanchard O., Mercier F., Surget E., le Cann P., Rivier A., Gangneux J.-P., Florentin A. Indoor air quality in two French hospitals: Measurement of chemical and microbiological contaminants // *Sci. Total. Environ.* 2018. Vol. 642. С. 168–179.
- 11 ГОСТ Р 54237-2010. Определение химического состава золы методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. М.: Стандартинформ, 2019. 23 с.
- 12 Ефимова О. С., Малышева В. Ю., Созинов С. А., Исмагилов З. Р., Панина Л. В. Исследование элементного состава пыли медицинского учреждения // *Вестн. Кузбасского гос. техн. ун-та.* 2021. Т. 148, № 6. С. 13–20.
- 13 ГОСТ 32979-2014 (ISO 29541:2010). Топливо твердое минеральное. Инструментальный метод определения углерода, водорода и азота. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с.
- 14 Ефимова О. С., Федорова Н. И., Созинов С. А., Исмагилов З. Р. Химический и гранулометрический состав угольной пыли из дегазационной установки шахты // *Химия уст. разв.* 2018. Т. 26, № 6. С. 597–602.
- 15 Zhuravleva N. V., Khabibulina E. R., Ismagilov Z. R., Efimova O. S., Osokina A. A., Potokina R. R. Chemical and granulometric composition of particles of solid atmospheric aerosol including black carbon in the snowpack on the territory of the industrial zone of Novokuznetsk city // *Химия уст. разв.* 2016. Т. 24, № 4. С. 509–519.
- 16 Стандартные образцы состава. Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН [Электронный ресурс]. URL:

- <http://www.igc.irk.ru/ru/standartnye-obraztsy-25-4> (дата обращения: 04.08.2022).
- 17 Falkovich A. H., Ganor E., Levin Z., Formenti P., Rudich Y. Chemical and mineralogical analysis of individual mineral dust particles // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2001. Vol. 106, No. D16. P. 18029–18036.
- 18 Ермолаев М. В. Биологическая химия. М.: Медицина, 1974.
- 19 Kim K.-H., Kabir E., Kabir S. A review on the human health impact of airborne particulate matter // *Environ. Int.* 2015. Vol. 74. P. 136–143.
- 20 Преч Э., Бюльманн Ф., Аффольтер К. Определение строения органических соединений. М.: Мир, 2006.
- 21 Sokrates G. Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts. Chichester: Wiley, 2004. 347 p.
- 22 Чезганова Е. А., Ефимова О. С., Сахарова В. М., Ефимова А. Р., Созинов С. А., Исмагилов З. Р., Брусина Е. Б. Оценка роли пыли в формировании резервуара мультирезистентных госпитальных штаммов микроорганизмов в отделениях хирургического профиля // *Фундам. и клин. медицина.* 2020. Т. 5, № 1. С. 15–25.