

И. И. Крутянский¹✉, М. А. Креймер², Е. А. Майманова²

Моделирование аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха после консервации отвалов в горнорудных районах

¹ФБУН «Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены» Роспотребнадзора,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: krutyanskiy_ii@niig.su

Аннотация: Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что массовые концентрации взвешенных частиц субмикронного диапазона, формирующиеся в горнорудных районах, представляют существенную угрозу для состояния атмосферного воздуха и здоровья населения. С использованием метода натурного моделирования был осуществлен анализ эмиссии мелкодисперсных частиц из образцов сульфидсодержащих отходов при различных температурных режимах. По результатам моделирования, в летний период высоко вероятны аккумуляции взвешенных частиц мелкодисперсного диапазона в приземных слоях атмосферы, что обусловлено зависимостью интенсивности атмосферной эмиссии от температурных режимов. В этой связи весьма актуальной представляется разработка и внедрение комплекса эколого-гигиенических мероприятий, направленных на снижение уровня воздействия мелкодисперсных фракций аэрозоля на окружающую среду и здоровье населения. Кроме того, целесообразно проведение социально-гигиенического мониторинга потенциально экспонируемых групп населения, проживающего в горнорудных районах, с целью своевременного выявления и предотвращения негативных последствий воздействия мелкодисперсных фракций аэрозоля.

Ключевые слова: субмикронные частицы, натурное моделирование, сульфидсодержащие отходы, канцерогенные свойства, мониторинг здоровья

I. I. Krutyansky¹✉, M. A. Kramer², E. A. Maymanova²

Modeling of aerosol pollution of atmospheric air after the conservation of landfills in mining areas

¹Novosibirsk Scientific Research Institute of Hygiene of Rospotrebnadzor,
Novosibirsk, Russian Federation

²Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: krutyanskiy_ii@niig.su

Abstract: The results of the study indicate that the massive concentrations of suspended particles in the submicron range, formed in mining regions, pose a significant threat to the state of atmospheric air and public health. Using the method of field modeling, the emission of fine particles from samples of sulfide-containing waste was analyzed under various temperature conditions. It has been established that in summer there is an increased risk of accumulation of carcinogenic particles in the surface layers of the atmosphere, due to the temperature characteristics and intensity of emission processes. In this regard, it seems necessary to develop and implement comprehensive monitoring measures aimed at reducing the impact of these substances on the environment and the health of citizens. In addition, it is advisable to conduct regular medical assessments of the health status of the

population living in mining areas in order to timely identify and prevent the negative effects of exposure to toxic substances.

Keywords: submicron particles, natural modeling, sulfide-containing waste, carcinogenic properties, health monitoring

Введение

В настоящее время загрязнение воздушной среды мелкодисперсными фракциями (PM10 и PM2.5) является глобальной проблемой, негативно влияющей на показатели заболеваемости и летальности населения вследствие кардиоваскулярных, респираторных и онкологических патологий [1,2,3,4,5,6]. Особую восприимчивость к воздействию высоких концентраций взвешенных частиц проявляют дети, пожилые люди и лица с хроническими заболеваниями. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) относит PM10 и PM2.5 к наиболее значимым факторам риска для здоровья населения [7]. Содержание мелкодисперсных частиц в атмосфере подвержено сезонным колебаниям, связанным прежде всего с изменениями температуры воздуха и почв. Дефицит информации об источниках эмиссий и характеристиках выделяющихся частиц, отсутствие установленных безопасных пороговых значений их воздействия требуют выработки интегрированного подхода к минимизации и решению проблемы аэрозольного загрязнения атмосферы [8,9]. Прогнозирование объемов эмиссии различных по физико-химическому строению аэрозолей является ключевым для анализа рисков и разработки мер по снижению негативного воздействия на среду обитания и здоровье населения.

Материалы и методы

В качестве натурной модели, способной воспроизвести характеристики отвала отходов, образованных в результате переработки золотосодержащих руд, использовались их образцы, отобранные в летний период, представляющие собой уменьшенную репрезентацию реального отвала. Метод натурного моделирования состоял в следующем: в герметичные камеры объемом 200 литров помещались электрические нагревательные элементы, на которых производили нагрев отобранных образцов горных отходов массой 1 килограмм до температурных значений $27,1 \pm 0,04$; $30 \pm 0,1$ и $50 \pm 0,3$ °C, имитирующих вариативные температурные условия, характерные для летнего периода в Кемеровской области.

Динамика изменений объемов эмиссии частиц из вещества отходов в модельную воздушную среду и формирование аэрозолей различного дисперсного состава, детерминированных температурным фактором, определяли посредством измерения массовых концентраций взвешенных частиц в воздушной среде камер. Измерения проводили ежедневно в трех сериях (до, в процессе и после нагрева образцов отходов) в 9:00, 12:00 и 16:00 часов. В ходе исследования с помощью спектрометра аэрозольного частиц «САЧМ 4801» было отобрано 99 проб воздуха, в которых определяли массовые концентрации взвешенных частиц с размерами в диапазоне от 1 до 10 микрометров.

Результаты

При графическом изображении результатов трех серий замеров, распределение массовых концентраций частиц аэрозоля является нелинейным и отображается сплайн-функцией (рис 1). Как видно, концентрации взвешенных частиц размерами 1-2,5 мкм (PM 2.5), выделяющихся из вещества отходов с минимумом $0,0002 \text{ мг/м}^3$ при 26°C и максимумами в $0,0341 \text{ мг/м}^3$ при температуре 48°C (рис 1.1) и $0,0182 \text{ мг/м}^3$ при температуре 52°C , достоверно различаются между собой ($p < 0,05$). При дальнейшем повышении температуры нагрева образцов отходов на $1-2^\circ\text{C}$ наблюдается их монотонное уменьшение.

График (рис 1.2) эмиссии взвешенных частиц размерами 2,5-10 мкм (PM 10) имеет распределение массовых концентраций, отображенных сплайн-функцией, с минимумом в $0,0004 \text{ мг/м}^3$ при температуре 49°C и максимумами $0,0161 \text{ мг/м}^3$ температуре 48°C и $0,0402 \text{ мг/м}^3$ при температуре 52°C , которые достоверно различаются между собой ($p < 0,05$).

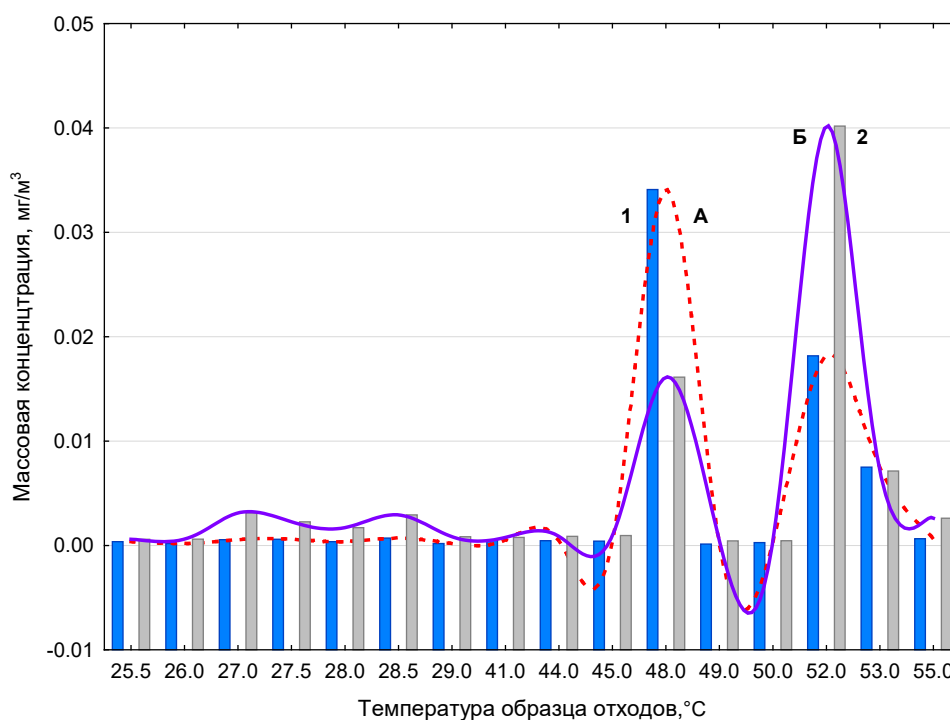


Рис. 1. Сопоставление концентраций мелкодисперсного аэрозоля в воздухе камеры 1 по данным эксперимента (1- синие столбцы PM 2.5, 2- серые столбцы PM 10) и по аппроксимируемой кривой (А- пунктирная линия PM 2.5, Б - сплошная линия PM 10).

Распределения выделяющихся из образца отходов в воздух камеры 2 массовых концентраций частиц мелкодисперсного аэрозоля размерами 1- 2,5 мкм (PM 2.5) представляют собой сплайн-функцию (рис 2, А), для которой характерны минимальное значение 0.0012 мг/м^3 при температуре $28,5^\circ\text{C}$ (рис 2, 2) и максимальное значение 0.0072 мг/м^3 при температуре 30°C . Данные уровни концен-

траций достоверно различаются между собой (в 6 раз, $p < 0,005$). В диапазоне температур 31-35°C наблюдается затухание колебаний концентраций.

График зависимости массовых концентраций в воздухе камеры массовых концентраций частиц мелкодисперсного аэрозоля размерами 2,5-10 мкм (PM 10) от температур вещества отходов (рис 2, Б) отображает подобную, но более выраженную зависимость, с минимумом 0.0007 мг/м³ при температуре 27,5°C и максимумом 0.0061 мг/м³ при температуре 30°C, которые достоверно не различаются между собой.

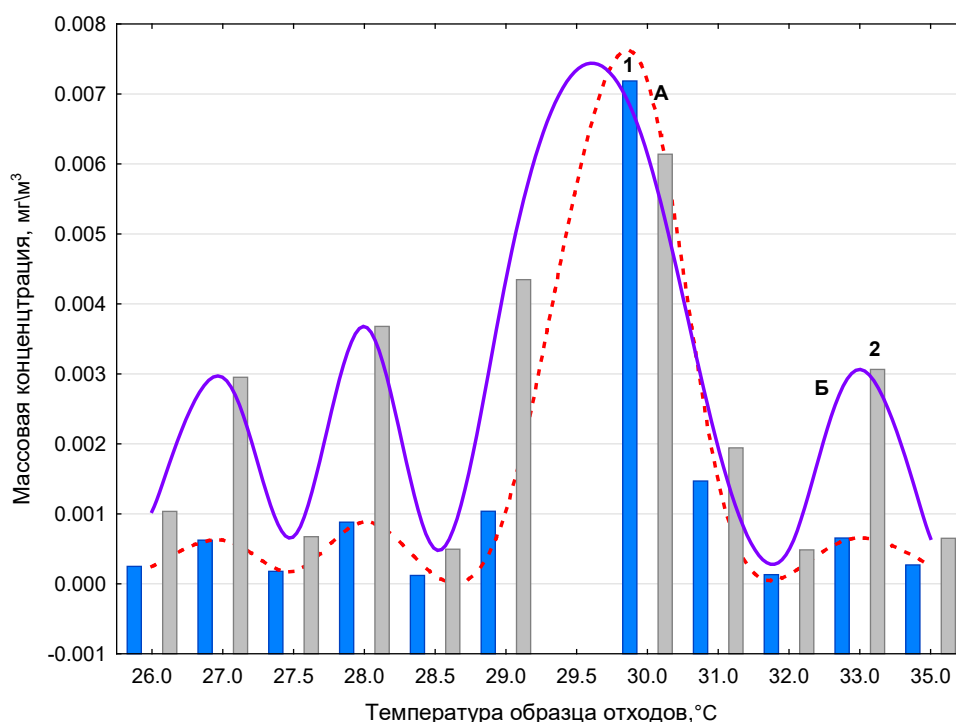


Рис. 2. Сопоставление концентраций мелкодисперсного аэрозоля в воздухе камеры 2 по данным эксперимента (1- синие столбцы PM 2.5, 2- серые столбцы PM 10) и по аппроксимируемой кривой (А- пунктирная линия PM 2.5, Б -сплошная линия PM 10).

При графическом изображении изменения массовых концентраций взвешенных частиц размерами 1- 2,5 мкм в воздухе камеры при температурах 25- 33°C выражаются в виде свободных затухающих колебаний с максимальным значением 0.0031 мг/м³- при температуре 26°C и минимальным в 0.0011 мг/м³- при температуре 29,5°C (рис 3, 1). При этом изменения значений концентраций при различных температурных режимах не являются статистически значимыми. Кривые массовых концентраций взвешенных частиц размерами 2,5- 10 мкм на графике отображаются аналогично, в виде свободных колебаний (рис 3, А).

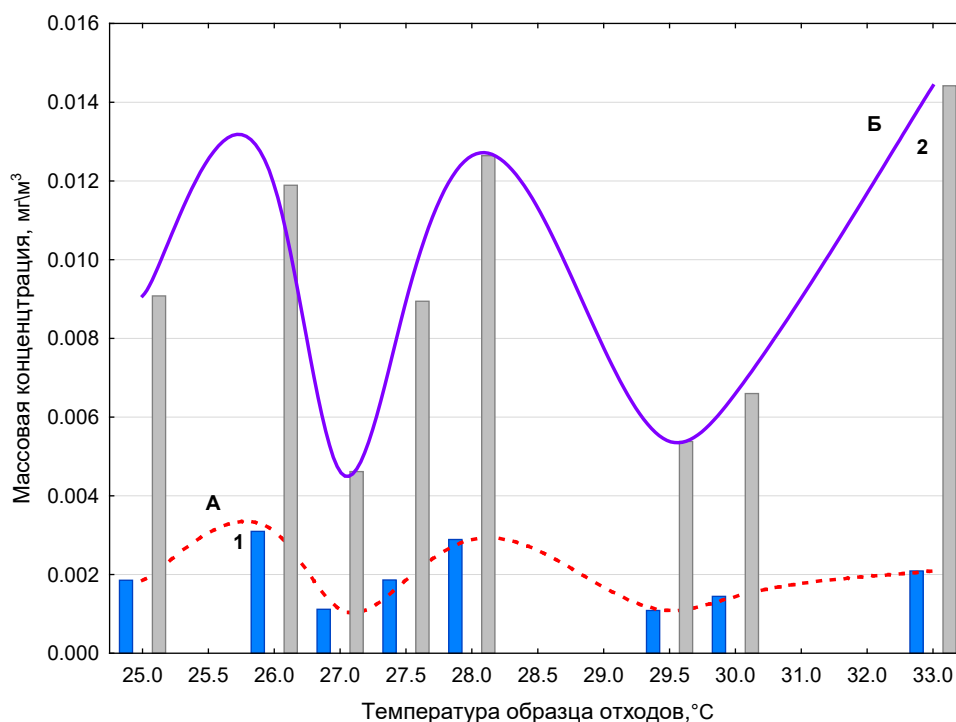


Рис. 3. Сопоставление концентраций мелкодисперсного аэрозоля в воздухе камеры 3 по данным эксперимента (1- синие столбцы РМ 2.5, 2- серые столбцы РМ 10) и по аппроксимируемой кривой (А- пунктирная линия РМ 2.5, Б -сплошная линия РМ 10).

Обсуждение

Отрицательное воздействие объектов размещения сульфидсодержащих отходов на воздушную среду в последние десятилетия является предметом исследований не только российских [10], но и зарубежных ученых [11,12]. Изыскания установили корреляцию между температурой нагрева приповерхностных пластов рассматриваемых объектов и атмосферной эмиссией композиций сернистых соединений [10]. Тем не менее, аспекты регионального аэрозольного загрязнения приземного слоя атмосферы в местностях дислокации сульфидсодержащих хвостохранилищ и отвалов почти не освещены в научной литературе. Этот осложняет проведение эколого-гигиенической экспертизы указанных объектов как источников загрязнения воздушной среды и научное обоснование мер по мелиорации и санации окружающей природы.

Проведенные токсикологические исследования подтверждают, что при выражении дозы поллютантов через массу некоторые ультрамелкие вдыхаемые нерастворимые частицы могут представлять большую опасность для здоровья человека, чем более крупные аналогичного состава [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]. Вместе с тем, существует мнение, также основанное на токсикологических исследованиях, что наиболее информативным показателем воздействия частиц на организм при их вдыхании является площадь поверхности, а не линейные размеры частиц [14, 17, 18, 21]. В этой связи можно заключить, что имеющейся на сегодняшний день информации недостаточно для определения релевантных по-

казателей аэрозольных частиц (число частиц определенного размера, площадь поверхности частиц и массовая концентрация) и, следовательно, адекватных методик их определения при оценке воздействия субмикронных аэрозолей на организм. Это особенно актуально в развивающихся областях нанотехнологий, когда негативное влияние искусственно созданных наночастиц на организм может быть значительным. В перспективе предполагается создание основы для более глубокого понимания связи между ключевыми характеристиками аэрозолей и спецификой их негативного влияния на показатели здоровья населения и работающих и научное обоснование соответствующих стандартов оценки маркеров экспозиции.

Заключение

Таким образом, доказанное в ходе натурного моделирования изменение интенсивности эмиссии мелкодисперсных аэрозолей по показателю их массовых концентраций в воздушной среде при нагревании сульфидсодержащих отходов, с точки зрения экологии человека, представляет потенциальную опасность для здоровья населения, проживающего в горнорудных районах. На основании визуального анализа полученных графических данных, допустимо заключение о наличии нерегулярных колебаний массовых концентраций мелкодисперсного аэрозоля в камере №3 и отсутствие корреляции между параметрами его эмиссии и внешним температурным воздействием на исследуемый образец.

Массовые концентрации (PM 2,5) взвешенных частиц в камере №2 во второй серии измерений достоверно превышали значения, полученные при первом и третьем измерениях (при температуре образцов отходов $27,9 \pm 0,1^\circ\text{C}$) в 4,4 и 14 раза соответственно. Колебания массовых концентраций PM 10 во второй серии замеров более чем в 5 раз превышали показания в третьей серии. Вынужденный характер колебаний значений концентраций, зафиксированный при графическом отображении, с высокой степенью вероятности указывает на влияние температурного фактора.

Результаты исследования натурной модели свидетельствуют о том, что в камере №1, в условиях нагрева образца отходов до максимальных температурных значений, массовая концентрация взвешенных частиц PM 2,5 достигает 0.0341 мг/м^3 при температуре образца отходов 48°C , а более крупных, PM 10- при 52°C и составляет 0.0702 мг/м^3 . Данный факт подтверждает выраженную зависимость характеристик эмиссии аэрозольных частиц от интенсивности нагрева исследуемого образца отходов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воздействие взвешенных частиц на здоровье. Значение для разработки политики в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии. Всемирная организация здравоохранения. 2013. № 20
2. A European aerosol phenomenology – 3: Physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe / Putaud J.-P. [et al.] // Atmospheric Environment. 2010. № 44. (10): P. 1308–1320.

3. The pharmacology of particulate matter air pollution-induced cardiovascular dysfunction/ Bai N. [et al.] // *Pharmacology & Therapeutics*. 2007. № 113. (1): P. 16–29.
4. Effects of particulate matter (PM₁₀, PM_{2,5} and PM₁) on the cardiovascular system / Polichetti G. [et al.] // *Toxicology*. 2009. № 261. P. 1–8.
5. Янин Е.П. Пылевые выбросы предприятий как источник загрязнения городской среды кадмием // *Экология урбанизированных территорий*. 2009. № 1. С. 30.
6. Загороднов С.Ю. Пылевое загрязнение атмосферного воздуха города как недооцененный фактор риска здоровью человека // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2018. № 2. С. 124.
7. Загороднов С.Ю., Май И.В., Кокоулина А.А. Мелкодисперсные частицы (PM_{2,5} и PM₁₀) в атмосферном воздухе крупного промышленного региона: проблемы мониторинга и нормирования в составе производственных выбросов // *Гигиена и санитария*. 2019 № 98 С. 142-147.
8. Трескова Ю.В. Оценка степени опасности мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе и целесообразность их нормирования // *Молодой ученый*. 2016. № 7. С. 291.
9. Методические проблемы мониторинга мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе населенных мест / Карелин А.О. [и др.] // *Гигиена и санитария*. 2016. № 95. С. 985.
10. Бортникова С.Б., Девятова А.Ю., Шевко Е.П. Перенос элементов в газоаэрозольной фазе из отвалов Комсомольского золотоизвлекательного завода // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2016. Т 24, №24. С. 11-22.
11. Linak W.P., Wendt J.O.L. Toxic metal emissions from incineration // *Progr. In Energy and Comb. Sci*. 1993. Vol. 19. P. 145-185.
12. Linak W.P., Wendt J.O.L. Trace metal transformation mechanisms during coal combustion // *Fuel Proc. Technol*. 1994. Vol. 39. P 173-198.
13. Oberdorster G., Gelein R.M., Ferin J. Weiss B. Association of particulate air pollution and acute mortality: involvement of ultrafine particles? // *Inhal. Toxicol*. 1995. № 7. P. 111— 124.
14. Oberdorster G. Toxicology of ultrafine particles: in vivo studies. // *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond*. 2000. P. 2719—2740.
15. Donaldson K., LI X.Y. MacNee W. Ultrafine (nanometer) particle mediated lung injury // *Journal of Aerosol Science*. 1998. № 29. P. 553—560.
16. Ultrafine particles: mechanisms of lung injury / Donaldson K. [et al.] // *PhH. Trans. Roy. Soc. Lond*. 2000. P. 2741—2749.
17. Size-dependent proinflammatory effects of ultrafine polystyrene particles: A role for surface area and oxidative stress in the enhanced activity of ultrafines. / Brown D.M., [et al.] // *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2001. № 175 (3). P. 191.
18. Inhalation of poorly soluble particles. II. Influence of particle surface area on inflammation and clearance. / Tran C.L [et al.] // *Inhal. Toxicol*. 2000. № 12 (12). P. 1113— 1126.
19. The role of free radicals in the toxic and inflammatory effects of four different ultrafine particle types / Dick C.A.J. [et al.] // *Inhal. Toxicol*. 2003. № 15 (1). P. 39—52.
20. MacNee W., Donaldson K. Mechanism of lung injury caused by PM₁₀ and ultrafine particles with special reference to COPD. // *Eur. Resp. J*. 2003. № 21. P. 47—51.
21. Influence of particle surface area on the toxicity of insoluble manganese dioxide dusts / Lison D. [et al.] // *Arch. Toxicol*. 1997. № 71 (12). P. 725— 729.

© И. И. Крутянский, М. А. Креймер, Е. А. Майманова, 2025