



Изучение в условиях *in vitro* трансформации твердых мелкодисперсных частиц пыли горно-металлургического предприятия

И.А. Хлыстов, Т.Н. Штин, Т.В. Бушуева, П.К. Харьковская, А.Н. Патрикеева,
Л.В. Кондакова, Е.Е. Новосельцева, Э.Г. Плотко

ФБУН «Екатеринбургский медицинский научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий», ул. Попова, д. 30, г. Екатеринбург, 620014, Российская Федерация

Резюме

Введение. При попадании внутрь организма мелкодисперсные частицы пыли могут вызывать значительные структурные и функциональные изменения на клеточном и субклеточном уровнях. Несмотря на продолжающиеся исследования взаимодействия частиц с отдельными белками, изменение свойств мелкодисперсных смесей в средах более сложного состава изучено недостаточно.

Цель исследования: изучить трансформацию частиц пыли горно-металлургического предприятия в культуральной среде, содержащей биологически активные молекулы.

Материалы и методы. Для эксперимента брали фракцию пыли промышленных выбросов размером менее 1 мкм (PM1). С помощью анализатора размеров наночастиц IG-1000 Plus (Shimadzu, Япония) методом диэлектрофореза были измерены физические параметры частиц исходной пыли, а также после ее взаимодействия с культуральной средой через 1, 24, 168, 336, 744 ч экспозиции. Культуральная среда состояла из сыворотки крови крупного рогатого скота и питательной среды «Игла MEM» с солями Эрла и глутамином.

Результаты. Было установлено уменьшение диапазонов распределения размеров твердых мелкодисперсных частиц пыли (от 13,04 до 44,52 и от 17,54 до 110,64 нм), повышение значений удельной поверхности (до 0,28 и 0,16 нм²/нм³) и коэффициентов диффузии (до $2,33 \times 10^{-14}$ и $1,34 \times 10^{-14}$ см²/с) через 168 и 336 ч экспозиции с культуральной средой, по сравнению с другими временными интервалами. Диапазоны распределения, средние значения размеров, удельная поверхность, геометрическая форма частиц были практически одинаковыми перед экспериментом и в конце него.

Выводы. При исследовании растворимости частиц пыли фракции PM1 в эксперименте *in vitro* установлено их взаимодействие с компонентами культуральной среды, характеризующееся изменением физических параметров частиц за период времени от 1 до 744 ч. Выявлены время-зависимые сдвиги размеров, формы, удельной поверхности и коэффициентов диффузии частиц.

Ключевые слова: горно-металлургическое предприятие, пыль, модельный эксперимент, биологически активные молекулы, твердые мелкодисперсные частицы, диэлектрофорез, физические свойства.

Для цитирования: Хлыстов И.А., Штин Т.Н., Бушуева Т.В., Харьковская П.К., Патрикеева А.Н., Кондакова Л.В., Новосельцева Е.Е., Плотко Э.Г. Изучение в условиях *in vitro* трансформации твердых мелкодисперсных частиц пыли горно-металлургического предприятия // Здоровье населения и среда обитания. 2025. Т. 33. № 10. С. 38–44. doi: 10.35627/2219-5238/2025-33-10-38-44

In Vitro Transformation of Fine Particles from a Mining and Metallurgical Enterprise

Ivan A. Khlystov, Tatiana N. Shtin, Tatiana V. Bushueva, Polina K. Kharkovskaya, Alla N. Patrikeeva,
Lidiya V. Kondakova, Elizaveta E. Novoseltseva, Edvard G. Plotko

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

Summary

Introduction: When inhaled, fine particles can cause significant structural and functional changes at the cellular and subcellular levels. Despite ongoing studies of the interaction of particles with individual proteins, changes in the properties of fine mixtures in more complex environments have been poorly studied.

Objective: To establish transformation of fine particles from a mining and metallurgical enterprise in a culture medium containing biologically active molecules.

Materials and Methods: Fine particles smaller than 1 μm (PM1) were used for the experiment. Physical parameters of the initial particles and those after 1, 24, 168, 336, and 744 hours of exposure to the culture medium were measured by dielectrophoresis using an IG-1000 Plus nanoparticle size analyzer (Shimadzu, Japan). The culture medium consisted of bovine blood serum and the Iglu minimum essential medium (Iglu-MEM) with Earle's salts and glutamine.

Results: Compared to other time intervals, we established a decrease in the size distribution ranges of fine particles (from 13.04 to 44.52 and from 17.54 to 110.64 nm), an increase in the specific surface area (up to 0.28 and 0.16 nm²/nm³) and diffusion coefficients (up to 2.33×10^{-14} and 1.34×10^{-14} cm²/s) after 168 and 336 hours of exposure to the culture medium, respectively. The distribution ranges, mean size values, specific surface area, and geometric shape of the particles were almost the same before and after the experiment.

Conclusions: The study of solubility of PM1 in an *in vitro* experiment showed the interplay between fine particles and the components of the culture medium manifested by changes in the physical parameters of the particles over a period of 1 to 744 hours. Time-dependent shifts in the size, shape, specific surface area, and diffusion coefficients of the particles were revealed.

Keywords: mining and metallurgical enterprise, particulate matter (PM), model experiment, biologically active molecules, fine particles, dielectrophoresis, physical properties.

Cite as: Khlystov IA, Shtin TN, Bushueva TV, Kharkovskaya PK, Patrikeeva AN, Kondakova LV, Novoseltseva EE, Plotko EG. *In vitro* transformation of fine particles from a mining and metallurgical enterprise. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2025;33(10):38–44. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2025-33-10-38-44

Введение. Загрязнение атмосферного воздуха является одной из важнейших проблем современности и серьезнейшим экологическим фактором, затрагивающим здоровье каждого человека [1]¹. Среди множества аэрогенных компонентов, приводящих к развитию заболеваний у людей, заслуживает внимания содержание взвешенных твердых частиц [1]. Агентством по охране окружающей среды США (Environmental Protection Agency – EPA) были установлены стандарты для находящихся в воздухе твердых частиц (PM – «particulate matter»): размером до 10 мкм в аэродинамическом диаметре (PM10) и менее 2,5 мкм (PM2.5)². Фракция пыли до 10 мкм называется торакальной, до 4,0 мкм – респираторной [2]. В Российской Федерации также установлены предельно допустимые значения для взвешенных частиц в атмосферном воздухе городских и сельских поселений³. Источниками поступления в атмосферный воздух мелких (PM2.5), чрезвычайно мелких (PM1) и ультрамелких частиц (PM0.1) выступают как естественные, так и антропогенные процессы [3, 4]. Невозможность законодательного регулирования фракции PM1 обусловлена недостаточностью данных об их воздействии на окружающую среду и здоровье человека, финансовых затратах на измерение [3], а зачастую и отсутствием необходимых методов исследования.

Размер частиц является важным параметром, определяющим не только их подвижность в окружающей среде, но и потенциальный риск для здоровья человека. От размера зависит их способность к проникновению, осаждению в легких, а также скорость их выведения [5, 6]. Воздействие PM2.5 увеличивает адгезию патогенов к эпителиальным клеткам, нарушает функцию эпителиального барьера, нарушает мукоцилиарный клиренс и снижает антимикробную активность, что приводит к увеличению содержания условно-патогенных микроорганизмов [7]. Пыль мелкой фракции может представлять угрозу для здоровья людей с сердечно-сосудистыми заболеваниями, повышая вязкость крови вследствие запуска воспалительных реакций в альвеолах при высвобождении цитокинов [8]. Высокодисперсные частицы размером менее 100 нм за счет высокой подвижности в окружающей среде и проникающей способности в организмы представляют наибольшую опасность [6]. При попадании внутрь организма они могут вызывать значительные структурные и функциональные изменения на клеточном и субклеточном уровнях [9]. Несмотря на наличие научных результатов, описывающих процессы

взаимодействия наноконпонентов с белками [10, 11], остается недостаточно изученным изменение физико-химических свойств мелкодисперсных частиц пыли сложного состава в средах с биологически активными молекулами на больших временных интервалах. Экспериментальное изучение трансформации мелкодисперсных частиц способно дать важную информацию при описании, моделировании процессов токсикокинетики и токсикодинамики в условиях биологической среды, а также разработки эффективных нанотехнологий в медицине.

Цель исследования – изучить трансформацию частиц пыли горно-металлургического предприятия в культуральной среде, содержащей биологически активные молекулы.

Материалы и методы. Для анализа была отобрана пыль промышленных выбросов в атмосферу от одного из стационарных источников горно-металлургического предприятия, после ее фракционного разделения при помощи многокомпонентной фильтрующей кассеты. Для улавливания твердых мелкодисперсных частиц PM1 (частицы размером менее 1 мкм) использовали нитрат-целлюлозные фильтры со средним диаметром пор 0,2 мкм. В качестве перифильтра (отсекателя) применяли кварцевый фильтр со средним диаметром пор 1,2 мкм.

Для определения физических свойств частиц PM1 исходную пыль с фильтра помещали в дистиллированную воду, не содержащую примесей твердых частиц. Для изучения растворимости пыль с фильтра помещали в раствор, состоящий из питательной среды «Игла MEM» с солями Эрла и глутамином в присутствии сыворотки крови крупного рогатого скота (КРС). Объем раствора составлял 15,00 см³. После тщательного перемешивания в течение 1 ч фракционный фильтр извлекали из раствора. Раствор фильтровали через мембранный фильтр со средним диаметром пор 1,00 мкм.

В течение 1 ч модельный раствор (частицы с культуральной средой) выдерживали в помещении лаборатории при температуре (20 ± 5) °C в условиях, соответствующих санитарно-гигиеническим требованиям для производственной среды³ и чистых помещений^{4,5,6,7}. Далее модельный раствор был помещен в термостат с температурой (37 ± 2) °C.

С помощью анализатора размеров наночастиц IG-1000 Plus методом диэлектрофореза были измерены физические параметры частиц исходной пыли, а также после ее взаимодействия с культуральной средой через 1, 24, 168, 336, 744 ч экспозиции. В ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора была

¹ Ambient (outdoor) air pollution [Электронный ресурс]. Доступно по: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). (дата обращения: 12.02.2025).

² Particulate Matter (PM) Basics [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM> (дата обращения: 12.02.2025).

³ СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=450207&ysclid=mfuswic2ru464475133> (дата обращения: 12.02.2025).

⁴ ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц. Москва: Стандартинформ, 2017. 35 с.

⁵ ГОСТ Р ИСО 14644-8-2014. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 8. Классификация чистоты воздуха по концентрации химических загрязнений. Москва: Стандартинформ, 2014. 23 с.

⁶ ГОСТ Р ИСО 14644-9-2013. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 9. Классификация чистоты поверхностей по концентрации частиц. Москва: Стандартинформ, 2014. 23 с.

⁷ ГОСТ Р ИСО 14644-10-2014. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 10. Классификация чистоты поверхностей по концентрации химических загрязнений. Москва: Стандартинформ, 2014. 36 с.

аттестована методика⁸ по определению физических параметров респираторной фракции аэрозолей с помощью диэлектрофореза, что позволило расширить применение данного метода в новом исследовании. Приборная база позволяет одновременно регистрировать статистические размеры мелкодисперсных твердых частиц по числу частиц, длине частиц, площади частиц, объему частиц; регистрировать динамическую вязкость анализируемой среды с использованием математического аппарата^{9,10}. Форма частиц была идентифицирована в соответствии с классификацией Фукса¹¹; коэффициент диффузии частиц вычислен по формуле Стокса – Эйнштейна [12, 13].

Результаты. В процессе взаимодействия твердых мелкодисперсных частиц пыли от стационарного источника выбросов с культуральной средой были

выявлены изменения всех физических параметров. Результаты исследований представлены в таблице.

Наиболее широкие границы диапазона распределения частиц были выявлены в образце исходной пыли после диспергирования в дистиллированной воде до начала эксперимента, а также через 1 и 744 ч экспозиции с биологически активными компонентами (рисунок А, В, F; таблица), тогда как существенное уменьшение диапазонов и среднего значения размера частиц наблюдалось после 168 и 336 ч (рисунок D, E; таблица).

Наименьшие значения удельной поверхности частиц выявлены у частиц пыли до начала эксперимента, через 24 и 744 ч экспозиции; а через 168 и 336 ч значения этого показателя были максимальными. После 1 ч экспозиции исходная геометрическая форма частиц (октаэдр) трансформировалась

Таблица. Физические параметры твердых мелкодисперсных частиц пыли после экспозиции с биологически активными молекулами

Table. Physical parameters of fine particles following exposure to biologically active molecules

Определяемый физический параметр частиц в анализируемой среде / Physical parameter of particles measured in the medium	Значения и характеристики физических параметров частиц до начала эксперимента / Values and characteristics of the physical parameters of particles before the experiment	Изменение физических параметров частиц после экспозиции в культуральной среде во времени, ч / Changes in physical parameters of fine particles after exposure to the culture medium over time, hours				
		1	24	168	336	744
Диапазон распределения твердых мелкодисперсных частиц, нм / Size distribution of fine particles, nm	32,60–954,61	0,84–984,77	26,09–562,03	13,04–44,52	17,54–110,64	40,95–882,26
Среднее значение размера твердых мелкодисперсных частиц по объему, нм / Mean size of fine particles by volume, nm	196,87 ± 31,50 *	72,16 ± 11,55	115,49 ± 18,48	21,44 ± 3,43	37,06 ± 5,93	192,37 ± 30,78
Среднее значение удельной поверхности твердых мелкодисперсных частиц, нм ² /нм ³ / Mean specific surface area of fine particles, nm ² /nm ³	0,03	0,09	0,05	0,28	0,16	0,03
Геометрическая форма и строение твердых мелкодисперсных частиц / Geometric shape and structure of fine particles	Октаэдр / Octahedron	Сильно вытянуты в одном или в двух измерениях (например, снежинка) / Elongated in one or two dimensions (e.g., a snowflake)	Шар / Sphere	Шар / Sphere	Шар / Sphere	Октаэдр / Octahedron
Коэффициент диффузии твердых мелкодисперсных частиц, D·10 ⁻¹⁴ , см ² /с / Diffusion coefficient of fine particles, D·10 ⁻¹⁴ , cm ² /s	2,42	0,71	0,46	2,33	1,34	0,24

Примечание: * – планка погрешности составляет ± 16 %.

Note: * the error bar is ± 16 %.

⁸ МУК 4.1.3923–23 Методика измерений массовой концентрации элементов, содержащихся в респираторной фракции аэрозолей, в индуцированной мокроте человека методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и обработкой данных по гранулометрическому составу.

⁹ A Novel Approach to Particle Size Measurement in the Single-Nanometer Range [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://www.americanlaboratory.com/914-Application-Notes/556-A-Novel-Approach-to-Particle-Size-Measurement-in-the-Single-Nanometer-Range/> (дата обращения: 12.02.2025).

¹⁰ Single Nano Particle Size Analyzer IG-1000 Plus [Электронный ресурс]. Доступно по: https://star-lab.am/upload/iblock/e83/tvr3g45gdc9wnmpf9c9g2l2rjnjbwha/ig_1000_plus_shimadzu.pdf (дата обращения: 12.02.2025).

¹¹ Фукс Н. А. Механика аэрозолей. Москва: Изд-во АН СССР, 1955. 351 с.

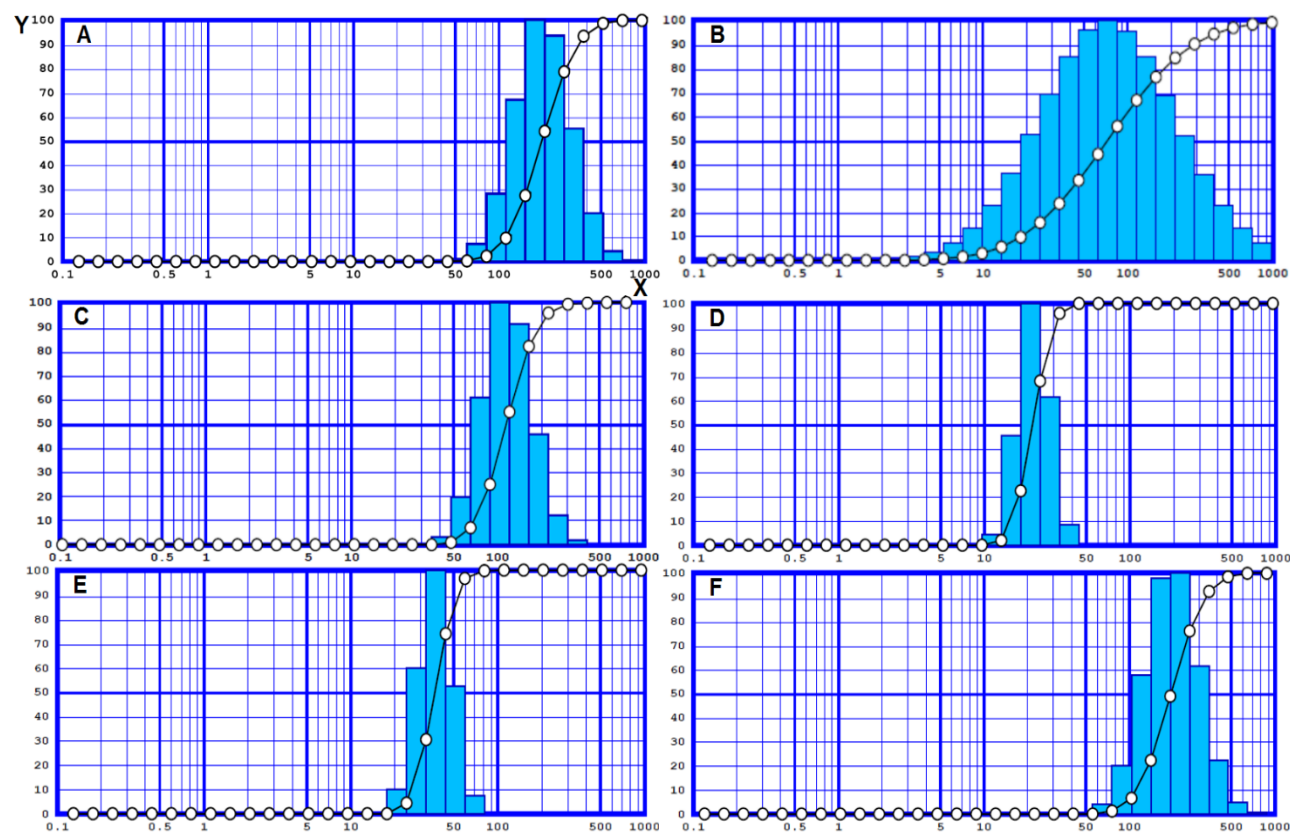


Рисунок. Кривые распределения размеров твердых мелкодисперсных частиц: А – исходной пыли после диспергирования в дистиллированной воде; после экспозиции в культуральной среде: В – через 1 ч; С – через 24 ч; D – через 168 ч; E – через 336 ч; F – через 744 ч (по оси X: размер частиц, нм; по оси Y: нормализованное количество частиц)

Figure. Particle size distribution curves for (A) original particles dispersed in distilled water and those following exposure to the culture medium during (B) an hour, (C) 24 hours, (D) 168 hours, (E) 336 hours, and (F) 744 hours (along x-axis: Particle size, nm; y-axis: Normalized particle count)

до сильно вытянутой (таблица). При дальнейшей экспозиции частицы приобретали форму шара, а при максимальном времени эксперимента форма частиц становилась октаэдрической.

Коэффициент диффузии частиц в анализируемой модельной среде был максимальным до экспозиции, а также после 168 и 336 ч экспозиции в культуральной среде. Диапазон распределения, среднее значение размера и удельной поверхности, геометрическая форма были практически одинаковыми у твердых мелкодисперсных частиц пыли до начала эксперимента и после 744 ч экспозиции.

Обсуждение. Состав содержащейся в атмосферном воздухе пыли может быть очень сложным, включать тяжелые металлы и токсичные элементы [14, 15]. Химический состав пыли может варьироваться в зависимости от типа металлургического процесса [6]. Негативный эффект от воздействия пыли на человеческий организм может быть обусловлен как ее элементным, так и дисперсным составом [8, 16, 17]. Обнаруженные изменения физических параметров мелкодисперсных частиц пыли свидетельствуют о происходящих взаимодействиях между компонентами системы во времени. Представленные результаты эксперимента и их обсуждение не затрагивают химический состав

пыли, а охарактеризованы только по физическим параметрам.

Среда «Игла MEM» с солями Эрла и с глутамином представляет растворенную в дистиллированной воде смесь неорганических солей, аминокислот, витаминов, глюкозы и предназначена для выращивания культур клеток. Использование данной среды создавало условия, приближенные к проведению цитологического эксперимента. Сыворотка КРС содержит белки, на которых широко изучены процессы взаимодействия высокодисперсных частиц и ионов металлов [9–11, 13], что позволяет интерпретировать установленные в ходе текущего эксперимента результаты. В частности, при исследовании взаимодействия наночастиц золота со смесью бычьего сывороточного альбумина и γ -глобулина в растворе было выявлено образование комплексов наночастиц исключительно с γ -глобулином [13]. Увеличение отношения поверхности к объему наночастиц, как правило, способствует адсорбции большего количества белков. Наряду с этим было показано, что высокодисперсные частицы (< 70 нм) имели более низкое сродство к человеческому сывороточному альбумину по сравнению с более крупными частицами (размером около 200 нм) из-за стерических эффектов, вызванных переполнением белков и меньшей площадью поверхности, доступной

для отдельных белков [18]. В соответствии с полученными результатами можно предположить более высокую адсорбционную способность по отношению к белку твердых мелкодисперсных частиц после 1, 24 и 744 ч экспозиции, а также частиц исходной пыли до эксперимента. С учетом состава используемой в эксперименте среды, наиболее приоритетным компонентом для взаимодействия с твердыми мелкодисперсными частицами пыли становится γ -глобулин. Однако нужно учитывать тот факт, что некоторые белки предпочитают связывать более гидрофобные или гидрофильные наночастицы [18]. Поэтому изучение свойств, поведения твердых мелкодисперсных частиц в биологических средах должно учитывать в том числе их растворимость в воде, размер и состав белковой короны.

В соответствии с информацией о зависимости между размером частиц, их подвижностью и проникающей способностью [6] наиболее вероятно прохождение через биологические мембраны высокодисперсных частиц после 1, 168 и 336 ч экспозиции в культуральной среде. Согласно экспериментальным данным [19, 20], наибольшим токсическим эффектом обладают частицы вытянутой формы за счет повреждения клеточных мембран. Следовательно, обнаруженные после 1 ч экспозиции высокодисперсные частицы сильно вытянутой формы потенциально более опасны для клеточных мембран в сравнении с шарообразными. Данное заключение обосновывает целесообразность изучения время-зависимого состояния клеточных мембран в экспериментах *in vitro*.

Выявленные в ходе эксперимента изменения размеров, геометрической формы частиц могли произойти под воздействием присутствующих либо образующихся в культуральной среде компонентов. В работе [21] экспериментально было установлено, что pH, температура, присутствие некоторых матричных компонентов раствора служат для управления анизотропным ростом наночастиц золота. К модифицирующим компонентам, добавляемым в раствор для образования и стабилизации наночастиц, относятся L-аскорбиновая кислота, 4-(2-гидроксиэтил)-1-пиперазинэтансульфоновая кислота, диметилформамид, реагенты с кислородсодержащими функциональными группами [21, 22]. Можно предположить, что те или иные присутствующие в культуральной среде компоненты в течение эксперимента играли роль модификаторов и стабилизаторов твердых мелкодисперсных частиц.

Коэффициент диффузии определяется отношением силы, обусловленной градиентом химического потенциала к коэффициенту трения частицы в растворителе [23]. По формуле Стокса – Эйнштейна [24] значение коэффициента диффузии обратно пропорционально радиусу частицы. Значительное уменьшение среднего значения размера частиц пыли после 168 и 336 ч экспозиции в культуральной среде приводит к повышению коэффициента диффузии и, как следствие, подвижности частиц и скорости связанных с ними химических реакций. Адсорбция белков на поверхности частиц приводит к изменению физико-химических параметров нано-

частиц, включая размер, дзета-потенциал, форму, поверхностный заряд и стабильность коллоидного раствора. Эти параметры влияют на взаимодействие наночастиц с клеткой, и изменения этих параметров впоследствии изменяют биологическую судьбу наночастиц [25]. Тем самым взаимодействие твердых мелкодисперсных частиц пыли с биологически активными молекулами способно привести к изменению их химической и биохимической активности и, как следствие, токсичности.

Таким образом, проведение исследований *in vitro* позволило установить связь и проследить во времени изменение свойств исходных компонентов, тогда как проведение эксперимента *in vivo* на аналогичном объекте исследования – твердых частицах пыли горно-металлургического предприятия – будет затруднено. Проведение модельных экспериментов с применением методов математической обработки позволит создавать условия по воздействию физических свойств твердых частиц различной дисперсности на биологическом уровне и прогнозировать их токсические свойства.

Выводы

1. В эксперименте *in vitro* в период от 1 до 744 ч наблюдались изменения физических параметров частиц: диапазоны распределения, средние значения размеров, удельная поверхность, геометрическая форма.

2. Наибольший диапазон распределения твердых мелкодисперсных частиц выявлен через 1 ч экспозиции (от 0,84 до 984,77 нм), тогда как через 168 и 336 ч диапазон был значительно уже (от 13,04 до 44,52 и от 17,54 до 110,64 нм). Частицы были сильно вытянутыми в одном или в двух измерениях через 1 ч, шарообразными через 24, 168, 336 ч, октаэдрическими через 744 ч. После 168 и 336 ч выявлены максимальные значения удельной поверхности (0,28 и 0,16 нм²/нм³). Диапазон распределения, среднее значение размера и удельной поверхности, геометрическая форма были практически одинаковыми у мелкодисперсных частиц пыли до начала эксперимента и после 744 ч экспозиции.

3. Результаты проведенного модельного эксперимента служат доказательством взаимодействия мелкодисперсной фракции пыли с биологически активными молекулами, что необходимо учитывать при оценке клеточной токсичности при планировании токсиколого-гигиенических исследований.

Благодарности. Авторы выражают благодарность научному руководителю д.м.н. В.Б. Гурвичу за помощь в организации работ и интерпретации данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Manisalidis I, Stavropoulou E, Stavropoulos A, Bezirtzoglou E. Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Front Public Health*. 2020;8:14. doi: 10.3389/fpubh.2020.00014
2. Brown JS, Gordon T, Price O, Asgharian B. Thoracic and respirable particle definitions for human health risk assessment. *Part Fibre Toxicol*. 2013;10:12. doi: 10.1186/1743-8977-10-12
3. Brzezina J, Köbölóvá K, Adamec V. Nanoparticle number concentration in the air in relation to the time of the

<https://doi.org/10.35627/2219-5238/2025-33-10-38-44>
Original Research Article

- year and time of the day. *Atmosphere*. 2020;11(5):523. doi: 10.3390/atmos11050523
4. Machaczka O, Jirik V, Brezinova V, et al. Evaluation of fine and ultrafine particles proportion in airborne dust in an industrial area. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(17):8915. doi: 10.3390/ijerph18178915
 5. Slezakova K, Morais S, do Carmo Pereira M. Atmospheric nanoparticles and their impacts on public health. In: Rodriguez-Morales AJ, ed. *Current Topics in Public Health*. InTech; 2013:503-529. doi: 10.5772/54775
 6. Ермолин М.С., Федотов П.С., Дженлода Р.Х. и др. Фракционирование, характеристика и анализ нано- и микрочастиц при оценке вклада металлургического предприятия в загрязнение городской пыли // Журн. аналит. химии. 2020. Т. 75. № 9. С. 844-853. doi: 10.31857/S0044450220090108
Ermolin MS, Fedotov PS, Dzenlod RK, et al. Fractionation, characterization, and analysis of nano- and microparticles in the estimation of the contribution of a metallurgical enterprise to the pollution of urban dust. *Journal of Analytical Chemistry*. 2020;75(9):1227-1235. doi: 10.1134/S1061934820090105
 7. Yang L, Li C, Tang X. The impact of PM2.5 on the host defense of respiratory system. *Front Cell Dev Biol*. 2020;8:91. doi: 10.3389/fcell.2020.00091
 8. Taylor DA. Dust in the wind. *Environ Health Perspect*. 2002;110(2):A80-A87. doi: 10.1289/ehp.110-a80
 9. Ji Y, Wang Y, Wang X, et al. Beyond the promise: Exploring the complex interactions of nanoparticles within biological systems. *J Hazard Mater*. 2024;468:133800. doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.133800
 10. Liu N, Tang M, Ding J. The interaction between nanoparticles-protein corona complex and cells and its toxic effect on cells. *Chemosphere*. 2020;245:125624. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125624
 11. Tavanti F, Menziani MC. Computational insight on the interaction of common blood proteins with gold nanoparticles. *Int J Mol Sci*. 2021;22(16):8722. doi: 10.3390/ijms22168722
 12. Hamada M, de Anna P. A method to measure the diffusion coefficient in liquids. *Transp Porous Media*. 2023;146(1-2):463-474. doi: 10.1007/s11242-021-01704-0
 13. Самсонова Ю.С., Петрова Г.П., Гибизова В.В. и др. Исследование взаимодействия молекул альбумина с наночастицами алмазов в водных растворах методом динамического рассеяния света // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 6. С. 484-488.
Samsonova YS, Petrova GP, Gibizova VV, et al. Investigation of interaction of albumin molecules with diamond nanoparticles in aqueous solutions by dynamic light scattering. *Quantum Electronics*. 2012;42(6):484-488. doi: 10.1070/QE2012v042n06ABEH014903
 14. May IV, Zagorodnov SYu. Dust emissions of industrial enterprises as a factor of negative impact on the agricultural territories. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*. 2019;315(5):052079. doi: 10.1088/1755-1315/315/5/052079
 15. Zhang G, Ding C, Jiang X, Pan G, Wei X, Sun Y. Chemical compositions and sources contribution of atmospheric particles at a typical steel industrial urban site. *Sci Rep*. 2020;10(1):7654. doi: 10.1038/s41598-020-64519-x
 16. Zychowski KE, Wheeler A, Sanchez B, et al. Toxic effects of particulate matter derived from dust samples near the Dzhidinski ore processing mill, Eastern Siberia, Russia. *Cardiovasc Toxicol*. 2019;19(5):401-411. doi: 10.1007/s12012-019-09507-y
 17. Alves C, Evtuygina M, Vicente E, et al. PM2.5 chemical composition and health risks by inhalation near a chemical complex. *J Environ Sci (China)*. 2023;124:860-874. doi: 10.1016/j.jes.2022.02.013
 18. Bilardo R, Traldi F, Vdovchenko A, Resmini M. Influence of surface chemistry and morphology of nanoparticles on protein corona formation. *Wiley Interdiscip Rev Nanomed Nanobiotechnol*. 2022;14(4):e1788. doi: 10.1002/wnan.1788
 19. Doshi N, Mitragotri S. Needle-shaped polymeric particles induce transient disruption of cell membranes. *J R Soc Interface*. 2010;7(Suppl 4):S403-S410. doi: 10.1098/rsif.2010.0134.focus
 20. Lee JH, Ju JE, Kim BI, et al. Rod-shaped iron oxide nanoparticles are more toxic than sphere-shaped nanoparticles to murine macrophage cells. *Environ Toxicol Chem*. 2014;33(12):2759-2766. doi: 10.1002/etc.2735
 21. Vinnacombe-Willson GA, Conti Y, Stefancu A, Weiss P S, Cortés E, Scarabelli L. Direct bottom-up *in situ* growth: A paradigm shift for studies in wet-chemical synthesis of gold nanoparticles. *Chem Rev*. 2023;123(13):8488-8529. doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00914
 22. Khalil MT, Zhang P, Han G, Wu X, Li B, Xiao M. Green synthesis of gold nanoparticles for catalytic reduction of 4-nitrophenol and methylene blue for sustainable development. *Sustain Polym Energy*. 2024;2(1):10002. doi: 10.35534/spe.2024.10002
 23. Katayama K, Nomura H, Ogata H, Eitoku T. Diffusion coefficients for nanoparticles under flow and stop-flow conditions. *Phys Chem Chem Phys*. 2009;11(44):10494-10499. doi: 10.1039/b911535h
 24. Unni M, Savliwala S, Partain BD, et al. Fast nanoparticle rotational and translational diffusion in synovial fluid and hyaluronic acid solutions. *Sci Adv*. 2021;7(27):eabf8467. doi: 10.1126/sciadv.abf8467
 25. Satzer P, Svec F, Sekot G, Jungbauer A. Protein adsorption onto nanoparticles induces conformational changes: Particle size dependency, kinetics, and mechanisms. *Eng Life Sci*. 2016;16(3):238-246. doi: 10.1002/elsc.201500059

Сведения об авторах:

✉ **Хлыстов Иван Андреевич** – к.б.н., старший научный сотрудник, заведующий лабораторией гигиены окружающей среды и экологии человека отдела комплексных проблем гигиены и профилактики заболеваний населения; e-mail: hlistovia@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4632-6060>.

Штин Татьяна Николаевна – к.х.н., заведующий отделом физико-химических методов исследования; e-mail: shtintn@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8846-8016>.

Бушуева Татьяна Викторовна – д.м.н., заведующий научно-производственным отделом «Лабораторно-диагностические технологии»; e-mail: bushueva@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5872-2001>.

Харькова Полина Константиновна – младший научный сотрудник лаборатории гигиены окружающей среды и экологии человека отдела комплексных проблем гигиены и профилактики заболеваний населения; e-mail: harkovark@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7927-0246>.

Патрикеева Алла Николаевна – заведующий отделом промышленной экологии и гигиенической экспертизы; e-mail: patrikeeva@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5375-5791>.

Кондакова Лидия Вадимовна – научный сотрудник отдела физико-химических методов исследования; e-mail: kondakova@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3961-060X>.

Новосельцева Елизавета Евгеньевна – лаборант лаборатории гигиены окружающей среды и экологии человека отдела комплексных проблем гигиены и профилактики заболеваний населения; e-mail: novoseltsevae@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4976-346X>.

Плотко Эдуард Григорьевич – д.м.н., научный консультант, главный научный сотрудник организационно-методического отдела; e-mail: edvardp@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3031-2625>.

Информация о вкладе авторов: концепция и дизайн исследования: *Хлыстов И.А., Штин Т.Н., Патрикеева А.Н., Плотко Э.Г.*; сбор данных, анализ и интерпретация результатов: *Хлыстов И.А., Штин Т.Н., Бушueva Т.В., Патрикеева А.Н.*; обзор литературы, редактирование: *Харькова П.К., Кондакова Л.В., Новосельцева Е.Е.*; подготовка проекта рукописи: *Хлыстов И.А., Бушueva Т.В.* Все авторы рассмотрели результаты и одобрили окончательный вариант рукописи.

Соблюдение этических стандартов: исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике, так как не содержит результаты клинических исследований (испытаний) с участием людей или животных в качестве испытуемых.

Финансирование: исследование проведено без спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Статья получена: 22.05.25 / Принята к публикации: 06.10.25 / Опубликовано: 31.10.25

Author information:

✉ Ivan A. **Khlystov**, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Environmental Health and Human Ecology, Department of Complex Problems of Hygiene and Disease Prevention; e-mail: hlistovia@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4632-6060>.

Tatiana N. **Shtin**, Cand. Sci. (Chem.), Head of the Department of Physicochemical Analytical Methods; e-mail: shtintn@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8846-8016>.

Tatiana V. **Bushueva**, Dr. Sci. (Med.), Head of the Research and Production Department of Laboratory Diagnostic Technologies; e-mail: bushueva@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5872-2001>.

Polina K. **Kharkova**, Junior Researcher, Laboratory of Environmental Health and Human Ecology, Department of Complex Problems of Hygiene and Disease Prevention; e-mail: harkovapk@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7927-0246>.

Alla N. **Patrikeeva**, Head of the Department of Industrial Ecology and Hygienic Expertise; e-mail: patrikeeva@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5375-5791>.

Lidiya V. **Kondakova**, Researcher, Department of Physicochemical Analytical Methods; e-mail: kondakova@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3961-060X>.

Elizaveta E. **Novoseltseva**, Laboratory Assistant, Laboratory of Environmental Health and Human Ecology, Department of Complex Problems of Hygiene and Disease Prevention; e-mail: novoseltsevae@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4976-346X>.

Edvard G. **Plotko**, Dr. Sci. (Med.), Scientific Consultant, Chief Researcher, Organizational and Methodological Department; e-mail: edvardp@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3031-2625>.

Author contributions: study conception and design: *Khlystov I.A., Shtin T.N., Patrikeeva A.N., Plotko E.G.*; data collection, analysis and interpretation of results: *Khlystov I.A., Shtin T.N., Bushueva T.V., Patrikeeva A.N.*; bibliography compilation and referencing, editing: *Kharkova P.K., Kondakova L.V., Novoseltseva E.E.*; draft manuscript preparation: *Khlystov I.A., Bushueva T.V.* All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

Compliance with ethical standards: Not applicable.

Funding: This research received no external funding.

Conflict of interest: The authors have no conflicts of interest to declare.

Received: May 22, 2025 / Accepted: October 6, 2025 / Published: October 31, 2025