

Влияние отходов черной металлургии на окружающую среду

E.P. Сунгатуллина, О.П. Сидельникова

Волгоградский государственный технический университет

Аннотация: В статье рассматривается влияние отходов черной металлургии на окружающую среду, в частности, на формирование мелкодисперсной фракции PM10. Анализ показал, что дисперсные материалы, возникающие при обращении с отходами, участвуют в формировании устойчивых аэрозольных структур, роль которых долгое время оставалась недооцененной из-за разрозненности данных и ограничений мониторинга. Выявлены скрытые механизмы участия металлосодержащих частиц в общей аэрозольной нагрузке. На основе обобщения сведений предложена методика, позволяющая по-новому оценивать вклад отходов металлургии в качество атмосферного воздуха.

Ключевые слова: мелкодисперсные частицы, PM10, металлургические отходы, пылеобразование, аэрозольная нагрузка, металлосодержащие аэрозоли, техногенное воздействие, качество атмосферного воздуха, вторичное распыление, экологический мониторинг, методика оценки влияния.

Чёрная металлургия занимает устойчивое место в промышленной структуре Российской Федерации и обеспечивает стальную основу строительного сектора, машиностроения, нефтегазовой инфраструктуры и транспорта. Отрасль включает свыше 1,5 тыс. предприятий, среди которых крупные интегрированные комбинаты и специализированные передельные заводы [1].

Годовой выпуск стали достигает 70–77 млн тонн, что позволяет России входить в число ведущих мировых производителей [1].

Металлургические мощности сосредоточены в промышленных регионах европейской части страны, на Урале и в Западной Сибири. Многие предприятия сформировались внутри городских территорий, вследствие чего крупные производственные площадки находятся в непосредственной близости от жилой застройки.

В Волгограде расположен один из крупнейших производителей специальных сталей завод «Красный Октябрь». Площадь промышленной территории составляет около 270 гектаров, инфраструктура охватывает полный цикл выплавки и обработки металлопродукции [2].

Масштаб предприятия иллюстрирует роль металлургического комплекса в экономике региона и уровень нагрузки на прилегающие территории.

Рост объёмов производства, расширение сырьевой базы и высокая концентрация трудовых ресурсов определяют значимость отрасли в экономическом развитии страны.

Металлургический комплекс влияет на динамику промышленного роста, формирует занятость и определяет структуру техногенного воздействия в местах размещения производств.

Производственные процессы чёрной металлургии сопровождаются образованием значительных объёмов твёрдых отходов, среди которых доменные и сталеплавильные шлаки, агломерационная пыль, газоочистные шламы и окалина.

По оценкам отраслевых обзоров, совокупный объём таких материалов в России превышает 100 млн тонн в год, включая около 15–20 млн тонн шлаков и не менее 8–12 млн тонн пылевых отходов и шламов [3,4].

Значительная часть этих материалов характеризуется высокой дисперсностью и способностью к распылению при хранении, перемещении и механическом воздействии.

Пылевые отходы металлургии представляют собой тонкодисперсные смеси оксидов железа, кремния, марганца и других элементов, образующихся при высокотемпературных процессах плавки и агломерации.

Газоочистные шламы содержат значительную долю частиц размером менее 50 мкм, включая остаточные продукты высокотемпературной газовой фазы.

При нарушении условий хранения подобные материалы формируют устойчивые источники вторичного пылеобразования.

Важной особенностью металлургических отходов является их склонность к диспергированию до мелких фракций. Разрушение структуры шлаков при дроблении, пересыпании и транспортировке сопровождается образованием частиц диаметром менее 10 мкм [5].

Наличие таких частиц связано как с технологическими особенностями производства, так и с физико-химическими характеристиками металлургических материалов.

Указанные процессы формируют предпосылки для накопления в атмосферном воздухе мелкодисперсной фракции. В экологическом анализе наиболее информативным показателем выступает PM10, поскольку частицы данного размера способны длительно находиться в воздушной среде, распространяться на значительные расстояния и переносить на поверхности соединения металлов, характерные для металлургических процессов [6,7].

Мелкодисперсные частицы PM10 рассматриваются как один из ключевых индикаторов качества атмосферного воздуха в промышленных регионах.

Работы, проведённые в зонах воздействия металлургических предприятий, фиксируют повышенные концентрации аэрозолей техногенного происхождения и устойчивое присутствие соединений железа, марганца, хрома и никеля [3, 6, 13].

Состав аэрозольной фракции отражает особенности процессов агломерации, плавки и термической переработки металлургического сырья.

Металлосодержащие частицы усиливают оксидативную нагрузку на дыхательную систему и повышают риск развития хронических респираторных нарушений.

Выявлена связь между длительным воздействием PM10 и ухудшением функциональных показателей сердечно-сосудистой системы, а также повышением общей токсической нагрузки на организм [8,9].

Во многих российских городах наблюдения за PM10 проводятся фрагментарно.

Измерения часто ограничены центральными районами или отдельными временными периодами, что приводит к несовпадению фактических значений с данными официального мониторинга [9,10].

Пробелы в наблюдениях также усложняют оценку влияния техногенных источников и снижают эффективность природоохранных решений.

Металлургические отходы формируют значительные объемы дисперсных материалов, склонных к вторичному распылению и переходу в аэрозольное состояние.

Химический состав пылевых частиц совпадает с металлургическим профилем выбросов, что обуславливает необходимость анализа их вклада в формирование PM10 в городской воздушной среде.

Учитывая сложившуюся ситуацию, становится ясным, что проблема оценки влияния металлургических отходов на содержание PM10 приобретает первостепенное значение как для промышленных территорий, так и для городских.

Исследования, выполненные в зоне воздействия металлургических производств, демонстрируют характерный химический профиль аэрозольных частиц. В работе [3] показано, что PM10 содержит устойчивые доли железа, марганца, хрома и никеля, что отражает процессы агломерации и плавки.

Аналогичная структура примесей выявлена в исследовании [6], где установлено совпадение состава PM10 и PM2.5 с технологическими циклами металлургического комплекса.

Публикации, посвященные промышленным регионам России, фиксируют повышенные уровни взвешенных частиц.

В работе [11] приведены данные о концентрациях PM10 и PM2.5, превышающих фоновые значения в зонах промышленной застройки.

В исследовании [7] показано влияние металлургических площадок на пространственное распределение аэрозолей и формирование устойчивых зон повышенной запылённости.

В исследовании, проведенном по периметру городского района, с замерами, в г. Волгоград формируют функциональные связи между РМ10 и РМ2.5, позволяющие оценивать соотношение фракций при ограниченности измерений [5]. В исследовании [6] отмечено присутствие мелких частиц в селитебных районах, формирующихся под воздействием техногенных источников.

Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.2604-10 устанавливают предельно допустимые уровни взвешенных частиц для населённых территорий, что позволяет оценивать соответствие фактических концентраций требованиям санитарного контроля.

Несмотря на значительный объём исследований, структура взвешенных частиц остаётся неоднородной в описаниях различных источников. Данные о составе аэрозольных фракций приводятся фрагментарно, а терминология и типология используются в широком диапазоне, что затрудняет сопоставление результатов.

Даже в нормативных документах, включая ГН 2.1.6.2604-10, отсутствует детализированная классификация, позволяющая системно описывать происхождение, размеры и морфологические особенности частиц.

Для устранения разрывов в трактовке дисперсного состава и обеспечения единообразия терминов обобщён анализ представленного материала, на основании которого сформирована классификация взвешенных частиц, приведённая в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация взвешенных частиц

Признак	Условное название	Разновидности и примеры
По происхождению		
Естественного происхождения	Природные	Минеральные: песчаные бури, выветривание горных пород, вулканическая активность. Смешанные: эрозия почв, лесные, степные и торфяные пожары. Органические: пыль растительного происхождения, пыльца, микроорганизмы, споры грибов.
Антропогенного происхождения	Техногенные	Частицы, формирующиеся при сжигании топлива, дорожных и строительных работах, добыче полезных ископаемых, производстве материалов, металлургических процессах.
Первичные	Первичные РМ	Частицы, поступающие в атмосферу непосредственно из природных или техногенных источников.
Вторичные	Вторичные РМ	Частицы, формирующиеся в атмосфере вследствие химических превращений SO_2 , NO_x , NH_3 и летучих органических соединений.
По размеру		
Мелкодисперсные (<0,25 мкм)	Тонкодисперсные аэрозоли	Дымовые частицы, сажа.
Среднедисперсные (0,25–10 мкм)	Микроскопические аэрозоли	Дымовые частицы, сажа.
Грубодисперсные (> 10 мкм)	Гигантские аэрозоли	Пыль природного и техногенного происхождения.
По форме		
Изометрические	Шаровидные	Частицы с приблизительно равными размерами в трёх направлениях: сажа, кремнезём.
Пластинчатые	Чешуйчатые	Частицы с преобладанием площади над толщиной.
Волокнистые	Цепочечные	Вытянутые частицы: асбест, стеклянные, металлические и растительные волокна.
По способу генерации		
Дисперсионные	-	Частицы, образующиеся при механическом разрушении и рассеивании твёрдых материалов. Характерны увеличенные размеры и нерегулярная форма.
Конденсационные	-	Частицы, формирующиеся при переходе вещества из газовой фазы в твёрдую или при фотохимических реакциях. Характерны малые размеры (<0,25 мкм).

Исследования, посвящённые аэрозольным выбросам metallurgических производств, содержат фрагментарные сведения о происхождении частиц, их химической структуре и токсикологических характеристиках.

Различия в терминологии и отсутствие единого подхода к систематизации данных ограничивают возможности сопоставления результатов.

Для устранения разрывов в описаниях обобщены ключевые признаки формирования PM10 metallurgического происхождения.

На основании анализа подготовлены таблицы, отражающие основные группы источников пылеобразования, химические типы частиц и их токсикологические параметры.

Таблица 2 – Классификация источников пылеобразования в черной металлургии

Группа	Подтип	Характеристика
Прямые источники	Агломерационное производство	Образование аглопыли при подготовке руды и обжиге шихты
	Доменные процессы	Пылевые выбросы при подаче сырья, выпуске газа и работе газоочисток
	Сталеплавильные процессы	Пылеобразование при продувке, разливке, шлакообразовании
	Металлообработка	Пылевые смеси при резке, шлифовке, дробеструйной обработке
Вторичные источники	Отвалы и складирование отходов	Формирование пыли при ветровой эрозии шлаков, шламов, агломерационной пыли
	Транспортировка сырья	Пылеобразование при перегрузке руды, угля, кокса
	Внутриплощадочные потоки	Пыль от автотранспорта, тракторов, перегружателей
	Регенерация отходов	Пылевые выбросы при переработке шламов и дроблении шлаков

Основные токсикологические параметры рассматриваются в работах [3,6]. Обобщенные данные наиболее часто встречающихся частиц приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные токсикологические параметры частиц PM10

Компонент	Источник формирования	Потенциальные эффекты	Нормативные ориентиры (ПДК или рекомендации)
Fe	Агломерация, доменная плавка, стальная пыль	Окислительное воздействие, воспалительные реакции	Отнесён к малоопасным, но усиливает токсичность смешанных аэрозолей
Mn	Агломерационная пыль, газоочистные шламы	Нейротоксичность при длительном воздействии	СанПиН и ГН: жёсткие ограничения на марганец в воздухе
Cr(VI)	Плавильные процессы, шлакообразование	Канцерогенность, мутагенность, поражение дыхательных путей	Международные нормы: крайне низкие допустимые уровни
Ni	Сталеплавильные выбросы, газовые аэрозоли	Аллергенность, раздражение слизистых, онкогенность	Ограничительные нормативы в промышленных зонах
Pb	Сопутствующие включения сырья и топлива	Нейротоксичность, нарушение развития у детей	Жёсткие санитарные регламенты (ГН, ВОЗ)

Анализ публикаций и нормативных материалов показывает отсутствие единых подходов к оценке вклада металлургических отходов в формирование PM10.

Исследования фиксируют концентрации частиц, дают данные по химическому составу или описывают пространственное распределение, однако в большинстве случаев параметры рассматриваются изолированно.

Недостаток интегральных оценок затрудняет сопоставление данных и определение экологической нагрузки в промышленных городах.

Учитывая особую опасность пылевых частиц с размерами менее 10 мкм, и особенно с размерами менее 2,5 мкм, для человеческого организма,

необходимо организовывать эффективную систему контроля за содержанием таких частиц в воздушной среде городов.

Для реального и наглядного представления влияния металлургических процессов предлагается модель, объединяющая концентрационные, химические и аэродинамические параметры.

Интегральный показатель нагрузки определяется выражением (1).

$$K_{PM10} = a * C_{PM10} + b * M + c * V, \quad (1)$$

Где C_{PM10} - средняя концентрация частиц, по результатам измерений, $\text{мкг}/\text{м}^3$

M – интегральный показатель металло содержания фракции (Объединенные доли Fe,Mn,Cr,Ni)

V – Коэффициент ветрового воздействия, зависящий от ветрового района

a, b, c – весовые коэффициенты, зависящие от количества точек проведенных наблюдений.

Интегральный показатель определяется выражением (1):

Использование интегрального показателя K_{PM10} позволяет перейти от разрозненных характеристик запылённости к комплексной оценке воздействия металлургических процессов на атмосферный воздух.

Учет концентрации PM_{10} в сочетании с металлоемкостью фракции и метеорологическими условиями дает возможность количественно определять вклад производственных площадок в формирование аэрозольной нагрузки.

Применение модели дает следующие практические результаты:

- а) позволяет выявлять участки, где рост концентраций $PM10$ связан не только с уровнем запыленности, но и с увеличением доли токсичных металлов в составе аэрозоля, что не определяется по концентрационным данным отдельно;

- б) обеспечивает ранжирование территорий по уровням воздействия, включая зоны с повышенной способностью к вторичному пылеобразованию, что важно при контроле открытых складов шлаков, шламов;
- в) создает основу для корректировки режимов работы газоочистных установок и пересмотра схем складирования отходов, поскольку изменение параметра M отражает влияние технологических операций на токсичность фракции;
- г) позволяет прогнозировать ухудшение качества воздуха при неблагоприятных метеоусловиях за счет параметра V , учитываяющего скорость и направление ветровых потоков;
- д) обеспечивает сопоставимость данных различных площадок и периодов наблюдений, поскольку сводит независимые параметры к единому числовому индикатору;
- е) формирует аналитическую основу для корректировки природоохранных мер и разработки локальных программ мониторинга в промышленных районах.

Интегральный показатель может применяться как самостоятельный критерий оценки состояния промышленных территорий и как элемент комплексной системы контроля качества атмосферного воздуха.

Исследование показало, что отходы черной металлургии формируют значительный объём дисперсных материалов, способных переходить в воздушную среду и увеличивать содержание PM_{10} .

Анализ литературных данных подтвердил присутствие металлов техногенного происхождения (Fe , Mn , Cr , Ni) в составе аэрозольной фракции, что указывает на влияние операций по обращению с отходами на качество атмосферного воздуха.

Выявлены основные источники пылеобразования, связанные со складированием, транспортировкой и переработкой металлургических отходов, и систематизированы ключевые типы частиц с учётом их происхождения, морфологии и токсикологических характеристик. Полученные классификации отражены в таблицах и формируют основу для последующей оценки вклада различных операций в формирование РМ10.

Предложена методика расчёта интегрального показателя КРМ10, позволяющая количественно оценивать влияние отходов металлургии на формирование мелкодисперсной фракции с учётом концентрационных, химических и аэродинамических параметров.

В отличие от существующих подходов, ориентированных преимущественно на измерение концентраций, предложенный показатель объединяет содержание токсичных металлов и условия вторичного пылеобразования, что повышает точность оценки аэрозольной нагрузки в городской среде.

Литература

1. Metallurgy in Russia. Overview of the Steel Industry. TPU Industry Review. URL: portal.tpu.ru.
2. Volgograd Steel Works “Red October”. Company Profile // SteelOrbis. URL: steelorbis.com/steel-companies/.
3. Almeida S. M., Lage J., Fernandes E. O., Reis M. A., Freitas M. C. Chemical characterization of atmospheric particles and source apportionment in the vicinity of a steelmaking industry // Science of the Total Environment. 2015. Vol. 521–522. P. 411–420. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2015.03.112](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.112).
4. Азаров В. Н., Иванова О. О., Добринская А. А., Соловьёва Т. В., Стреляева А. Б., Евдокимов Е. Е., Белогородская М. Ю. Определение зависимости концентрации мелкодисперсной пыли РМ2,5 и РМ10 в

- атмосфере селитебных территорий // Инженерный вестник Дона. 2024. № 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2024/9545
5. Азаров Д. В., Маринин Н. А., Стреляева А. Б., Иванов В. А., Шибаков В. А. Об оценке PM10 и PM2,5 в жилищном строительстве // Жилищное строительство. 2013. № 2. С. 30–32.
 6. Dai Q.-L., Fu Y., Deng Z., Liu J., Li L. Characterization and Source Identification of Heavy Metals in Ambient PM10 and PM2.5 in an Integrated Iron and Steel Industry Zone // Aerosol and Air Quality Research. 2015. Vol. 15. P. 875–887. DOI: 10.4209/aaqr.2014.09.0226.
 7. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2014 году / под ред. И. А. Серебрицкого. СПб.: Дитон, 2015. 180 с.
 8. Glushakova O. V. Influence of ferrous-metallurgy enterprises on atmospheric air quality // MISIS Journal of Metallurgy and Ecology. 2021. № 2. P. 35–42.
 9. Манжилевская С. Е., Петренко Л. К., Кобелева И. С. Снижение влияния загрязнения частицами мелкодисперсной пыли PM0,5–PM10 при строительстве на здоровье рабочих // Инженерный вестник Дона. 2020. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2020/6530
 10. World Health Organization. Health effects of particulate matter. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2013. 20 p.
 11. Загороднов С. Ю., Солдатова Е. Д., Малинова Л. В. Мелкодисперсные частицы PM2.5 и PM10 в атмосферном воздухе крупного промышленного региона: проблемы мониторинга и нормирования // Российский журнал здоровья, атмосферы и среды. 2019. № 1. С. 45–58. URL: cyberleninka.ru/article/n/melkodispersnye-chastitsy-pm2-5-i-pm10-v-atmosfernem-vozduhe-krupnogo-promyshlennogo-regiona-problemy-monitoringa-i-normirovaniya-v

References

1. Metallurgy in Russia. Overview of the Steel Industry. TPU Industry Review. URL: portal.tpu.ru.
2. Volgograd Steel Works “Red October”. Company Profile. SteelOrbis. URL: steelorbis.com/steel-companies/.
3. Almeida S. M., Lage J., Fernandes E. O., Reis M. A., Freitas M. C. Science of the Total Environment, 2015, Vol. 521–522, pp. 411–420.
4. Azarov V. N., Ivanova O. O., Dobrinskaya A. A., Solov’eva T. V., Strelyanova A. B., Evdokimov E. E., Belogorodskaya M. Yu. Inzenernyj vestnik Dona, 2024, No. 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2024/9545
5. Azarov D. V., Marinin N. A., Strelyanova A. B., Ivanov V. A., Shibakov V. A. Zhilishchnoe stroitel’stvo, 2013, No. 2, pp. 30–32.
6. Dai Q.-L., Fu Y., Deng Z., Liu J., Li L. Aerosol and Air Quality Research, 2015, Vol. 15, pp. 875–887.
7. Doklad ob ekologicheskoy situatsii v Sankt-Peterburge v 2014 godu [Report on the Environmental Situation in Saint Petersburg in 2014] / pod red. I. A. Serebritskogo. SPb.: Diton, 2015. 180 p.
8. Glushakova O. V. MISIS Journal of Metallurgy and Ecology, 2021, No. 2, pp. 35–42.
9. Manzhilevskaya S. E., Petrenko L. K., Kobeleva I. S. Inzenernyj vestnik Dona, 2020, No. 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2020/6530
10. World Health Organization. Health effects of particulate matter. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2013. 20 p.
11. Zagorodnov S. Yu., Soldatova E. D., Malinova L. V. Rossiiskii zhurnal zdorov’ya, atmosfery i sredy, 2019, No. 1, pp. 45–58.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 8.12.2025

Дата публикации: 24.01.2026