

ЗАГОРОДНОВ СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОНИТОРИНГА, КОНТРОЛЯ И
НОРМИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ
НА БАЗЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ И
СИТУАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

1.6.21. Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном бюджетном учреждении науки «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека

Научный руководитель: **Май Ирина Владиславовна**
доктор биологических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Рапута Владимир Федотович**,
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Новосибирск

Костылева Наталья Валерьевна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник – начальник отдела прикладной экологии Федерального государственного бюджетного учреждения «Уральский государственный научно-исследовательский институт региональных экологических проблем»,
г. Пермь

Ведущая организация: Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (обособленное подразделение ГНБУ «Академия наук Республики Татарстан»), г. Казань

Защита диссертации состоится 14 декабря 2023 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.12 по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (www.pstu.ru).

Автореферат разослан 27 октября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д ПНИПУ.05.12
кандидат технических наук, доцент

Е.В. Калинина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Загрязнение атмосферного воздуха урбанизированных территорий пылью (взвешенными веществами, твердыми частицами) в течение многих лет является экологической и санитарно-гигиенической проблемой в России и за рубежом. Установлены и доказаны факты формирования под воздействием взвешенных частиц дополнительной смертности и/или заболеваемости населения (С.А. Pope, D.W. Dockery, J. Schwartz, L.M. Neas, WHO). Научные исследования акцентируют опасность для здоровья человека мелкодисперсных пылей с диаметром частиц менее 10 и 2,5 мкм (PM10 и PM2.5) (С.А. Pope, D.W. Dockery, L. Curtis, P. Smith-Willis, L. Zhengzheng, Б.А. Ревич, и др.).

В Российской Федерации ежегодно в атмосферный воздух стационарными источниками выбрасывается порядка 1,6 млн. тонн пыли (Минприроды РФ, 2021). На постах экологического мониторинга повсеместно фиксируются нарушения допустимых уровней содержания взвешенных веществ. При декларируемом сокращении выбросов твердых веществ на 30% за период 2012-2021 гг., в целом по стране загрязнение воздуха пылью сохраняется на стабильном уровне: снижение за этот период не более чем на 6%. Сохраняется тренд на увеличение количества городов с установленными фактами повышенного пылевого загрязнения воздуха: 2016 г. – 43 города, 2018 г. – 52, в 2021 – 120 (Минприроды РФ, 2022 г.). Взвешенные вещества, в том числе мелкодисперсные, входят в число приоритетных загрязняющих примесей в 34 из 40 российских городов с наибольшими индексами загрязнения атмосферы (ИЗА>14), среди которых Астрахань, Красноярск, Нижний Тагил, Челябинск, Новокузнецк, Норильск, Улан-Уде, Чита и пр.

Вместе с тем, при выполнении расчетов в целях экологического нормирования выбросов, хозяйствующие субъекты в основном декларируют отсутствие превышений гигиенических нормативов пыли. Данные об источниках выбросов мелкодисперсных пылей в стране практически отсутствуют. Из 118 действующих методик расчета твердых выбросов только 6 указывают на необходимость учета частиц PM10 и PM2.5. Зачастую не указывается, что в составе пылей присутствуют такие опасные вещества, как бен(а)пирен, плохо растворимые фтористые соединения, соли и оксиды тяжелых металлов. Все это снижает информативную ценность данных о выбросах и эффективность системы управления выбросами.

Актуальность настоящей работы определяется необходимостью разработки инструментов, позволяющих корректно учитывать химический и дисперсный состав выбросов промышленных пылей, адекватно оценивать их воздействие на окружающую среду и здоровье граждан, обеспечивать эффективное управление, в том числе через систему экологического нормирования.

Степень разработанности темы исследований. Основной объем отечественных и зарубежных исследований нескольких последних десятилетий ориентирован на изучение уровней загрязнения воздуха мелкодисперсными пылями в городах или в зонах влияния отдельных объектов (С.А. Pope, D.W. Dockery, J.A. Acosta, П.А. Коузов, В.Н. Азаров, А.И. Рожков, Е.П. Янин, Г.Я. Липатов, К.Л. Чертец, Н.В. Зайцева, Н.Д. Левкин, А.Р. Шагидуллин и др.). Вопросам методического обеспечения мониторинга и анализа дисперсного состава пылей посвящены работы П.В. Коузова, В.Н. Азарова, В.Ф. Рапуть, Н.В. Костылиной и др. Реже обсуждаются аспекты компонентного состава пылей, оценки вклада отдельных объектов в пылевое загрязнение, подходы к нормированию выбросов пыли.

Остается нерешенным ряд методических проблем по корректной оценке геоэкологической ситуации в зонах влияния пылящих источников, по доказательному установлению источников пыления, управлению выбросами с целью повышения экологической безопасности населения.

Объект исследования – пылевые выбросы предприятий, приземные концентрации пылей, геоэкологические характеристики среды, уровни воздействий на население.

Предмет исследования – особенности компонентного и дисперсного состава пылевых выбросов, методы идентификации пылевых частиц в воздухе, профили выбросов, риски для здоровья населения в условиях загрязнения атмосферы твердыми веществами.

Выявленные проблемы определили **цель исследования**: научное обоснование совершенствования систем инвентаризации, мониторинга и нормирования твердых промышленных выбросов на базе анализа компонентного и дисперсного состава пылей, геоэкологического картирования и ситуационного моделирования.

Гипотеза исследования состояла в том, что уточнение компонентного и дисперсного состава пылевых выбросов будет иметь следствием изменение оценок экологической ситуации и потребует новых подходов к мониторингу и экологическому нормированию твердых веществ.

Для реализации поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Установить дисперсный и компонентный состав пылевых выбросов источников ряда отраслей промышленности, в том числе с применением новых методов анализа твердых смесей, сформировать базы данных и библиотеки атрибутированных микрофотографий пыли.

2. Выполнить анализ полученных оценок экологической ситуации при различных входных параметрах пылевых промышленных выбросов.

3. Предложить подход к оценке долевого вклада источников загрязнения атмосферы твердыми частицами на основе установления компонентного профиля пылевых выбросов.

4. Обосновать порядок выбора точек мониторинга атмосферного воздуха для корректной оценки уровня пылевого загрязнения атмосферного воздуха на урбанизированных территориях и рисков для здоровья населения.

5. Разработать подходы к совершенствованию экологического нормирования и контроля промышленных пылевых выбросов для повышения эффективности управления качеством атмосферного воздуха.

Научная новизна:

– Доказано, что декомпозиция пылевых промышленных выбросов по критериям дисперсности и химического состава является основой адекватной оценки экологической ситуации в зонах влияния источников выбросов.

– Разработан инновационный способ качественного и количественного определения пылевых частиц в атмосферном воздухе с применением элементов компьютерного зрения, библиотеки атрибутированных микрофотографий пылей и метода нейронных сетей.

– Предложена методика оценки вклада хозяйствующих субъектов в загрязнение атмосферы твердыми частицами на основе новых подходов - построения компонентных профилей пылевых выбросов.

– Обоснован алгоритм выбора точек и формирования программ мониторинга загрязнения атмосферного воздуха твердыми веществами, обеспечивающий оптимизацию системы наблюдений по критериям специфики структуры и интенсивности загрязнения и риска для здоровья населения.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы состоит в расширении методической базы идентификации и параметризации твердых частиц в атмосферном воздухе; в формировании новых знаний о компонентном и дисперсном составе промышленных пылей; в разработке понятия «профиль пылевого выброса» как инструмента оценки вклада источника в загрязнение; в доказательстве значимости установления химического и фракционного состава выбросов для корректной оценки опасности (безопасности) экологической ситуации; в совершенствовании подходов к организации экологического мониторинга и нормирования выбросов.

Практическая ценность работы заключается в возможности применения полученных данных при проведении инвентаризации источников выбросов различных отраслей промышленности. Предлагаемые подходы обеспечивают потребности хозяйствующих субъектов в организации производственного контроля и позволяют решать задачи государственного экологического нормирования выбросов.

Материалы проведенных комплексных исследований дисперсного и компонентного состава выбросов были использованы горнодобывающими и горноперерабатывающими предприятиями (г. Мирный, г. Красноярск), металлургического и машиностроительного комплексов (г. Пермь, г. Чусовой). Результаты определения профиля пылевых выбросов использованы крупным горнодобывающим комплексом, расположенный на территории г. Березники Пермского края, при установлении источников повышенного загрязнения атмосферного воздуха взвешенными веществами на границе санитарно-защитной зоны предприятия и определении долевого вклада объекта в уровень приземных концентраций.

Методология и методы исследования. Методология исследования предполагала последовательный анализ всех этапов алгоритма действий по управлению выбросами (инвентаризация, моделирование загрязнения, мониторинг ситуации, установление нормативов допустимых выбросов) с развитием научно-методической поддержки отдельных звеньев этого алгоритма. При выполнении диссертационного исследования проводились выездные обследования источников пылевыделения промышленных предприятий, отбор и лабораторный анализ отобранных образцов пылей с применением широкого спектра современных физико-химических методов (лазерной дифракции, энерго-дисперсионного анализа, электронной микроскопии, рентгено-фазного анализа и др.). Анализ образцов проводился на базе «Центра наукоемких химических технологий и физико-химических исследований» Пермского национального исследовательского политехнического университета и испытательного лабораторного центра ФБУН «ФНЦ медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» (аттестат аккредитации № RA.RU.21HA51 от 26.12.2017 г.).

Расчеты рассеивания и ситуационное моделирование рассеивания выполняли в соответствии с «Методами расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» (утв. приказом Минприроды России от 06.06.2017 г. № 273).. Оценку риска здоровью населения выполняли по методологии, принятой Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

В работе использованы общенаучные методы исследования (анализ, синтез, обобщение, сравнение), методы статистического анализа (корреляционный анализ, сравнение средних).

Положения, выносимые на защиту:

1. Установление компонентного и дисперсного состава промышленных выбросов твердых веществ повышает адекватность и корректность оценок уровня экологической опасности (безопасности) территорий и населения.

2. Применение современных методов компьютерного зрения и нейронных сетей расширяет возможности оперативного исследования химического и фракционного состава твердых частиц в атмосферном воздухе.

3. Построение профиля пылевого выброса – инструментально подтвержденной стабильной химической структуры пылевой смеси – позволяет доказательно установить долевые вклады источников в загрязнение, определить маркерные для источника вещества.

4. Использование профилей пылевых промышленных выбросов, выбор «маркерных» веществ для инструментальных измерений, геоэкологическое картирование загрязнения и оценка рисков для населения обеспечивают оптимальный выбор точек и программ мониторинга атмосферного воздуха в части содержания взвешенных веществ.

5. Включение в систему экологического нормирования всех видов учитываемых твердых веществ, в том числе мелкодисперсных частиц, повысит эффективность управления пылевыми выбросами и обеспечит более высокий уровень экологической безопасности.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов определена использованием современных методов сбора, обработки и анализа первичных данных, применением статистических методов обработки полученных результатов. В основу диссертационной работы включены материалы длительного исследования, выполненного в рамках научно-исследовательских работ за период 2014–2021 гг. Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов подтверждена большим объемом накопленных данных (более 500 отобранных проб) собственных исследований, выполненных на объектах горнодобывающие, металлургической и машиностроительной отраслей промышленности, сходимостью результатов, получаемых при параллельных и/или повторных исследованиях.

Апробация результатов. Основные результаты исследований и выносимые на защиту положения докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Химия. Экология. Урбанистика» (г. Пермь, 2019), Международной конференции «8th International Conference on Environmental Science and Technology» (г. Мадрид, Испания, 2017 г.), Международном симпозиуме «Инженерные науки и науки о земле: прикладные и фундаментальные исследования» (г. Грозный, 2019 г.), Международной конференции «Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies» (AGRITECH-2019, AGRITECH-III-2020) (г. Красноярск, 2019 г., 2020 г.), Международной научно-практической конференции «Экологическое строительство и устойчивое развитие. Экосистема городского пространства» (г. Пермь, 2018 г.), Международном Форуме Научного совета Российской Федерации по экологии человека и гигиене окружающей среды и проблеме: «Экологические проблемы современности: выявление и предупреждение неблагоприятного воздействия антропогенного детерминированных факторов и климатических измерений на окружающую среду и здоровье населения» (г. Москва, 2017 г.) и др.

Публикация по результатам исследований. Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 24 печатных работы, из которых 18 в журналах индексируемых в международных реферативных базах: Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, GeoRef, 2 – в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, зарегистрировано 2 объекта интеллектуальной собственности (базы данных), 2 статьи в прочих изданиях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 27 таблиц и 33 рисунка. Состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 181 наименование, семи приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой темы диссертационной работы, сформулированы цель, задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен критический анализ действующих подходов к оценке, нормированию и регулированию пылевых выбросов. Показано, что пылевые промышленные выбросы в действующей российской системе экологического нормирования учитываются не в полной мере. Пылевые частицы PM₁₀ и PM_{2.5} практически не выделяются хозяйствующими субъектами при проведении инвентаризации

источников. Акцентировано, что загрязнение атмосферного воздуха твердым частицами формирует недопустимые риски повышенной смертности и заболеваемости населения.

Вторая глава посвящена описанию материалов и методов, использованных в диссертационной работе. Показано, что исследование фракционного и компонентного состава пылевых выбросов проведено для 75 типовых операций (источников выделения) предприятий различных отраслей промышленности: черная и цветная металлургия, машиностроительная, горнодобывающая.

Исследовано более 500 образцов пылей. Дисперсный состав пылей устанавливали с применением лазерного анализатора частиц Microtrac S3500 (диапазон частиц от 20 нм до 2000 мкм). Компонентный состав и морфологию частиц определяли методом электронного микроскопирования высокого разрешения (до 300 000) с рентгено-флуоресцентной приставкой S3400N «НИТАСН». Химический состав образцов идентифицировали рентгенофазовым анализом (XRD-700 «Shimadzu»).

Расчеты концентраций в приземном слое атмосферы выполняли с применением лицензионной программы «Эколог-Город» 4.70.0. Ситуационное моделирование и картографирование результатов выполняли с использованием модуля ГИС «Эколог» и программных продуктов ArcView 3.2 и ArcGIS 9.3.1.

В третьей главе доказано, что пылевые выбросы исследованных предприятий разнообразны по дисперсному и химическому составу. Практически все исследованные образцы промышленных пылей включали мелкие фракции PM10, PM2.5. Выборочные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Дисперсный состав пылевых выбросов различных технологических процессов

Технологическая операция/оборудование	Доля частиц PM10, %	Доля частиц PM2.5, %	Медианный размер, мкм
Машиностроение производство			
Отрезные станки	32.97±4.95	7.07±1.06	16
Сверлильные станки	13.45±2.02	6.7±1.00	72
Фрезерные станки	38.78±5.82	5.22±0.78	15
Наждаки	30.01±4.50	5.18±0.77	21
Металлургическое производство			
Загрузка шлака грейфером	55.52±8.33	44.46±6.67	4
Электросталеплавильная печь	38.22±5.73	16.71±2.50	20
Выпуск чугуна (литейный двор)	84.34±12.65	78.53±11.78	1
Горнодобывающее производство			
Пересып руды на ленточный конвейер	32.33±4.85	14.61±2.19	30
Пересып готовой продукции в смесители	48.41±7.26	6.19±0.93	10
Грохоты	36.36±5.45	6.12±0.92	18

Установлено, что массовая доля мелкодисперсных частиц в составе пылевых выбросов находилась в широком диапазоне, и составляла для предприятий черной и цветной металлургии 8-84% PM10, 4-78% PM2.5, машиностроительных предприятий 4-40% PM10, 5-20% PM2.5, горнодобывающей промышленности 15-50% PM10, 2-25% PM2.5, горно-перерабатывающей промышленности 1-85% PM10, 2-57% PM2.5 и строительной отрасли 23-67% PM10, 9-24% PM2.5.

На момент изучения ни в одном случае хозяйствующие субъекты не выделяли мелкодисперсные частицы в составе выбросов и не включали их в ведомости инвентаризации источников. Соответственно, ни в одном случае мелкодисперсные фракции не были включены в систему экологического нормирования.

Химический состав пылевых выбросов в каждом конкретном случае определялся характером и параметрами технологического процесса, и в отдельных случаях был сложным и многокомпонентным. В большинстве случаев спектр выбрасываемых веществ

был существенно шире, чем учитывалось предприятиями в составе ведомостей инвентаризаций и подлежало экологическому регулированию.

В ряде случаев составные компоненты пылевого выброса имели более жесткие гигиенические нормативы, чем примеси, задекларированные в ведомости инвентаризации хозяйствующего субъекта (таблица 2).

Таблица 2 – Примеры учета химических веществ по данным расчетных методик и результатов углубленных исследований

Источник выделения	Учет химических веществ по данным хозяйствующих субъектов на основе расчетных методик			Выделяемые химические вещества, установленные по результатам исследований			
	Код ¹	Наименование	ПДКсс/сг	Код	Наименование	ПДКсс/сг	%
Машиностроительное предприятие Отрезной станок	2902	Взвешенные вещества	0.15/0.075	121	Сульфат железа	0.007/-	20.64
				323	Диоксид кремния	0.02*	16.10
				138	Магний оксид	0.05/-	13.50
				123	Железа оксид	0.04/-	6.70
				128	Оксид кальция	0.3*	7.46
				101	Оксид алюминия	0.01/0.005	2.60
				008	PM10	0.06/0.04	33.0
				010	PM2.5	0.035/0.025	7.1
Машиностроительное предприятие Токарный станок	2902	Взвешенные вещества	0.15/0.075	123	Железа оксид	0.04/-	86.40
				143	Марганец и его соед.	0.001/0.00005	0.94
				2902	Взвешенные вещества	0.15/-	0.36
				203	Хром (на Cr ₂ O ₃)	0.0015/0.000008	0.29
				008	PM10	0.06/0.04	12.00
				010	PM2.5	0.035/0.025	0.40
Горнодобывающее производство Пересып песка	2907	Пыль неорганическая, более 70% SiO ₂	0.05/-	323	Диоксид кремния	0.02*	26.16
				101	Оксид алюминия	0.01/0.005	8.94
				152	Натрий хлорид	0.15/-	3.01
				128	Кальций оксид	0.3*	1.22
				138	Магний оксид	0.05/-	0.96
				123	Железа оксид	0.04/-	0.61
				008	PM10	0.06/0.04	42.29
				010	PM2.5	0.035/0.025	16.78

*ОБУВ

Результаты анализов химического и дисперсного состава пылей позволили сформировать значительные базы данных и библиотеки атрибутированных микрофотографий, предложить и апробировать инновационный метод определения отобранных из атмосферного воздуха твердых частиц.

Разработанный аппаратно-программный комплекс на первом этапе реализует итерационный алгоритм измерения концентрации с помощью PM-датчика SDS011 и метода лазерной дифракции для определения твердых частиц в воздушном потоке. Операция позволяет выделять частицы PM_{2,5} и PM₁₀ в широком рабочем диапазоне 0,0–999,9 мкг/м. Для фотографирования используется миниатюрный микроскоп iMicro Q2, с увеличением в 800 раз. Классификация и вычисление размеров частиц с помощью модели нейронной сети и системы «компьютерного зрения» выполняется на микрокомпьютере nVidia Jetson Nano. Обучение нейронной сети выполнено с применением библиотек микрофотографий пылей разных производств и технологических операций, накопленных в 2014–2021 гг. Изображения на каждой микрофотографии сопровождаются параметрами химического, фракционного и морфологического состава пыли. Объекты размечены с указанием расположения и контуров образов, которые должна распознавать нейросеть. Для разметки использовали Coco-annotator – веб-инструмент для аннотирования изображений (рисунок 1).

¹ Код вещества – здесь и далее: условные номер, принимаемый в настоящее время в системе экологического нормирования выбросов

Аппаратное и программное обеспечение разработано кафедрой автоматики и телемеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета.

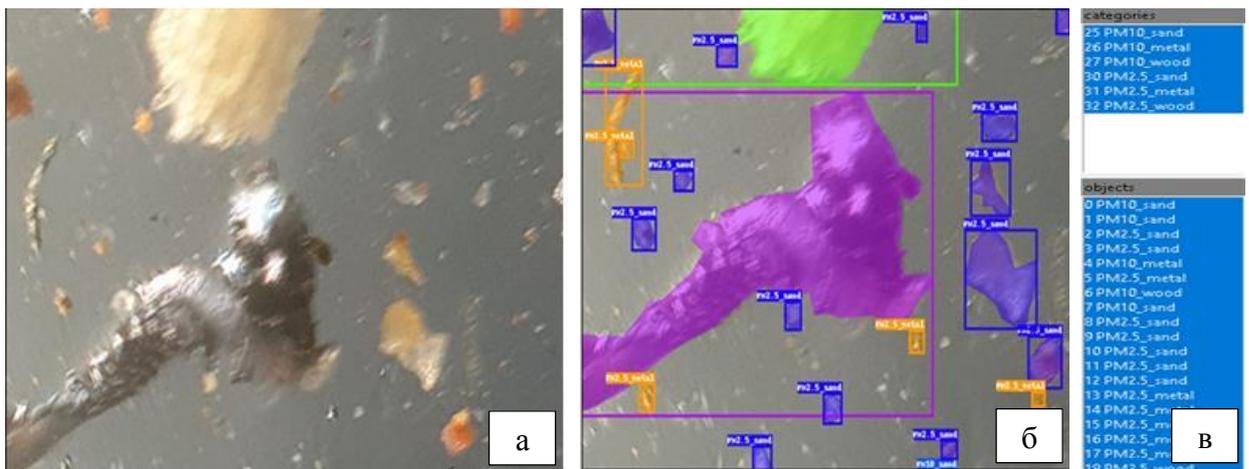


Рисунок 1 – Исходное изображение пылевых частиц (а) и результат распознавания пылевых частиц (б, в)

Достоинством предложенного подхода измерения является возможность оперативного определения дисперсного и компонентного состава пылей (идентификация и количественное определение химического состава пылевой компоненты воздуха стандартными методами требует периода от нескольких дней до нескольких недель). Сходимость измерений, полученных стандартными методами и с применением предложенного подхода, оценивается как удовлетворительная.

В целом доказано, что учет пылевых выбросов различных технологических операций и процессов в настоящее время не в полной мере адекватен реальной структуре пылевых смесей и не в полной мере характеризуют опасность этих выбросов.

Некорректная характеристика выбросов является причиной неточных геоэкологических оценок. Так, оценка воздействия металлургического предприятия (производство первичного алюминия) по данным инвентаризации характеризовала ситуацию на границе санитарно-защитной как нормативную: приземные концентрации пыли не превышали 0,47 ПДК_{с.с.} Предприятие не планировало разработки дополнительных мероприятий. Гарантировалась экологическая безопасность населения (рисунок 2а).

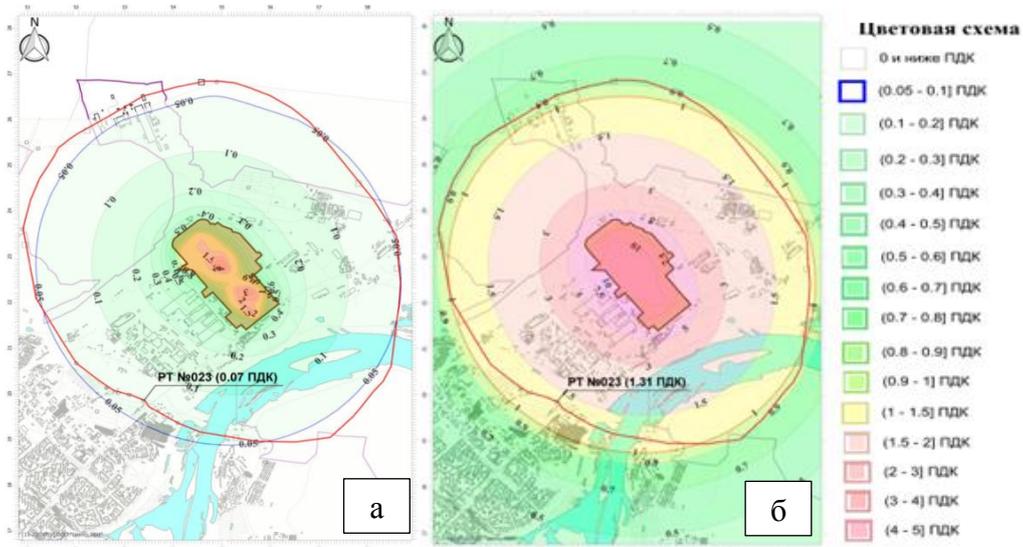


Рисунок 2 – Геоэкологическое картирование загрязнения территории твердыми веществами, доли ПДК_{с.с.}: а) по данным ведомости инвентаризации; б) с учетом исследований компонентного состава выбросов

Однако в составе пылевого выброса был определен Al_2O_3 , доля которого составляла 84-87%. На границе санзоны концентрация оксида алюминия определялась на уровне до 1,3 ПДКс.с. Оценка геоэкологической ситуации менялась кардинально (рисунок 2б) – на неудовлетворительную. В зону негативного воздействия попадали более 60 участков садового товарищества и 10 жилых домов, детские дошкольные учреждения. Ситуация характеризовалась как требующая мероприятий по снижению выбросов пыли.

Неучет мелкодисперсных фракций пыли также имел следствием искажение оценок экологической ситуации. На рисунке 3 представлены результаты ситуационного моделирования в зоне машиностроительного предприятия при разных входных данных. Площади зон влияния объектов, в выбросах которых учитывались частицы PM_{10} и $PM_{2.5}$, были в 1,5-2 раза больше, чем без учета мелких фракций пыли. В зонах фактического загрязнения регистрировали уровни недопустимого риска для здоровья населения, которые требовали меры по их снижению (рисунок 3а, б), чего не предполагалось в первом случае (рисунок 3а).

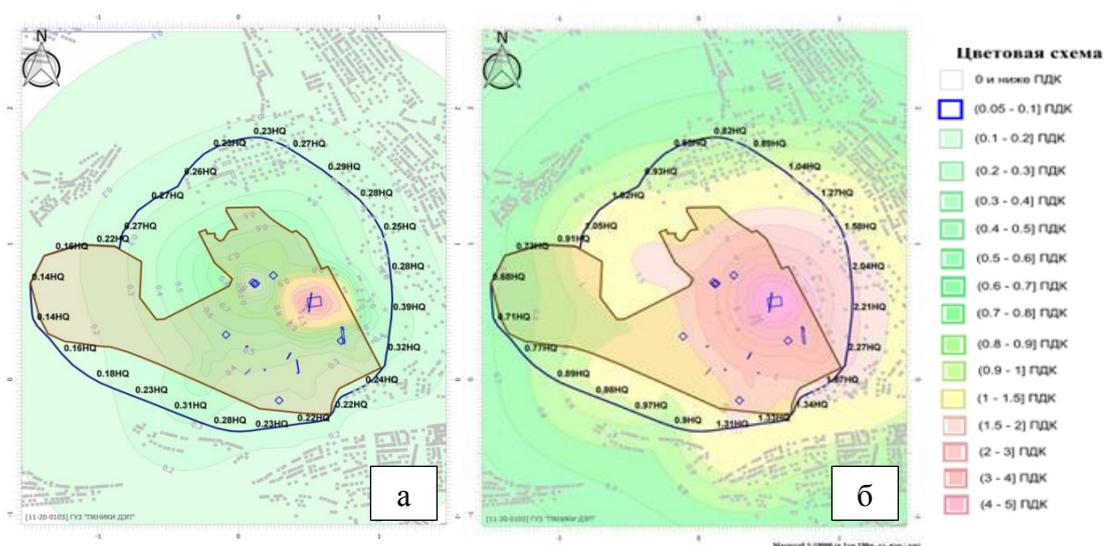


Рисунок 3 – Территориальное распределение уровней острого ингаляционного неканцерогенного риска, доли HQ_{ac} :

а) по данным ведомости инвентаризации; б) с учетом выброса PM_{10}

Таким образом, доказано, что некорректность учета выбросов может приводить к значительной недооценке экологической опасности и иметь следствием отсутствие адекватных ситуации управленческих решений.

Пылевые выбросы в атмосферу являются причиной накопления токсичных химических веществ в почвах в результате переноса и оседания частиц, что было подтверждено в зоне влияния пылящих отвалов бывшего горнообогатительного предприятия по добыче вольфрама и молибдена. Учет компонентного состава пылей в зоне влияния объекта показал наличие значительного числа соединений металлов, в том числе высокотоксичных: Pb – 0,12 %; Mn – 0,11 %; Zn – 0,08%, W – 0,14%; Cr – 0,01%; V – 0,005%; Cd – 0,001%; As - 0,005; Ni - 0,002%; Co - 0,001%. Все указанные элементы регистрировались в воздухе жилой застройки в значимых, но допустимых концентрациях, а соединения свинца – на уровнях до 2 ПДК, железа – до 1,5 ПДК.

Многолетний перенос токсичных металлов воздушными массами привел к тому, что геоэкологическое состояние почв в зоне ближайшей жилой застройки характеризовалось как крайне неблагоприятное (таблица 3). Для жителей населенного пункта суммарный канцерогенный риск, связанный с загрязнением воздуха и почв компонентами пылей, характеризовался как «настораживающий» и составлял на момент исследования $8,36 \cdot 10^{-4}$ для детского и $7,80 \cdot 10^{-4}$ для взрослого населения при допустимом уровне $1,0 \cdot 10^{-4}$.

Таблица 3 – Содержание ряда токсичных элементов в почвах жилой застройки в зоне пыления отвалов бывшего горнообогатительного комбината

Показатели	Zn	Pb	Cd	Cu	Ni	Mn	Cr
	Детские площадки в зоне влияния пыления отвалов						
ПДК (подвижная форма), мг/кг	23	6	–	3	4	100	6
% проб с превышением ПДК	36.0	50.1	0.00	43.2	11.1	13.3	0.00
Максимальная из концентр., мг/кг	30.43	15.17	0.03	8.00	5.79	121	0.08
	Садово-огородные участки в зоне влияния пыления отвалов						
% проб с превышением	46.2	43.1	0.00	37	0.36	0.10	0.00
Максимальная из концентр., мг/кг	32.13	85.67	0.07	56.67	7.92	126	0.08

Для обеспечения надежной и точной оценки экологической ситуации и оценки рисков для здоровья населения при воздействии пылей представляется целесообразным:

– выполнение в ходе инвентаризации источников выбросов химического анализа пылевой компоненты и/или использование стандартизованных методик или атласов, справочников и пр., обеспечивающих полную расшифровку пылей и учет всех твердых соединений, имеющих ПДК или ОБУВ в соответствии с результатами;

– определение массовой доли частиц PM10 и PM2.5 в составе выбросов и их учет как самостоятельных нормируемых примесей.

В четвертой главе описаны разработанные подходы к оценке вклада источников в загрязнение. Установлено, что химическая структура пылевого выброса от конкретного технологического процесса (операции), характеризуется определенной устойчивостью. Пример – в таблице 4. Выявленные зависимости и полученные результаты позволили сформулировать понятие «профиль пылевого выброса» как относительно стабильную химическую структуру пылевой смеси.

Таблица 4 – Обоснование профиля пылевого выброса источников объекта по добыче и переработке калийных руд и производства первичного алюминия

Химическое вещество	Массовая доля в составе выброса, %			
	Проба №1	Проба №2	Проба №3	Профиль выброса
Объект по добыче и переработке калийных руд				
KCl	86.58	42.71	75.66	68.32±10.77
NaCl	2.59	32.67	10.42	15.23±7.35
CaSO ₄	НПО	10.12	НПО	3.04±6.00
CaO	НПО	4.17	НПО	4.17±0.00
SiO ₂	6.76	1.35	1.13	3.08±1.5
AlCl ₃	НПО	2.71	1.03	1.87±0.49
MgSO ₄	1.39	НПО	НПО	1.39±0.00
Al ₂ O ₃	0.77	0.57	0.38	0.57±0.09
MgO	0.46	НПО	НПО	0.46±0.00
Прочие	1.44	5.7	11.38	6.17±2.35
Объект по производству первичного алюминия				
Al ₂ O ₃	86.10	84.83	87.36	86.10±0.60
NaF	5.68	7.04	4.33	5.68±0.64
CaF	2.42	3.01	1.82	2.42±0.28
FeS ₂	2.23	2.69	1.77	2.23±0.22
SiO ₂	2.38	–	1.49	1.94±0.26
FeO	0.93	2.22	–	1.57±0.37

Профиль выбросов рассматривали как инструмент адекватной оценки и доказательной базы вклада предприятия в фактическое загрязнение в конкретной точке территории, который рассчитывается по приведенной формуле:

$$\Delta_k^{Пред} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (C_{ik}^{Атм} - C_{ik}^{Пред})}{\sum_{i=1}^N C_{ik}^{Атм}}$$

где:

$C_{ik}^{Атм}$ – концентрация i -го загрязняющего вещества в атмосферном воздухе, установленная в k -ой точке, мг/м^3

$C_{ik}^{Пред}$ – концентрация i -го загрязняющего вещества в атмосферном воздухе, формируемая выбросами предприятия в k -ой точке, мг/м^3

Так, сопоставление профиля пылевого загрязнения, построенного с учетом профиля выброса источника, с профилем пылевого загрязнения в точке измерения на границе санитарно-защитной зоны показало их существенное различие (таблица 5).

Таблица 5 – Вклад источников предприятия горно-перерабатывающего профиля в уровень загрязнения атмосферного воздуха на границе СЗЗ по выбрасываемым (пылевым) химическим веществам

Химическое вещество	Профиль пылевого загрязнения от источника* (мг/м^3)	Профиль фактического пылевого загрязнения в точке измерения** (мг/м^3)	Вклад предприятия на границе СЗЗ в общее пылевое загрязнение, %	Вклад предприятия на границе СЗЗ в концентрацию примеси, %	Фоновое загрязнение, %
KCl	0.0371	0.0383	1.42	96.87	0.05
NaCl	0.0281	0.0296	1.08	94.93	0.06
AlCl ₃	0.0023	0.006	0.09	38.33	0.14
Прочие	0.0377	0.111	1.44	33.96	2.81
MgSO ₄	0.0029	0.0118	0.11	24.58	0.34
SiO ₂	0.0299	0.7762	1.15	3.85	28.58
MgO	0.002	0.0535	0.08	3.74	1.97
Al ₂ O ₃	0.009	0.4133	0.34	2.18	15.48
CaO	0.0014	0.1989	0.05	0.70	7.56
Fe ₂ O ₃	0.0033	0.9589	0.13	0.34	36.60
MnSO ₄	0.00	0.0135	0.00	0.00	0.52
Итого:	0.154	2.611	5.9		94.1

*Расчет на основании профиля выброса **Результат инструментального измерения

Это различие было подтверждено сопоставительным анализом микрофотоснимков пылевых частиц на источниках выбросов и на границе санзоны. Большинство частиц выбрасываемых источниками предприятия имели однотипную кристаллическую форму, характерную для солей (рисунок 4а). Идентифицированные твердые частицы на границе СЗЗ предприятия кардинально отличались по морфологическим признакам (рисунок 4б).

Соотнесение профилей позволило оценить вклад предприятия в загрязнение воздуха на границе санзоны на уровне 6%. Полученные результаты поставили задачу выявления реальных причин и условий загрязнения атмосферы.

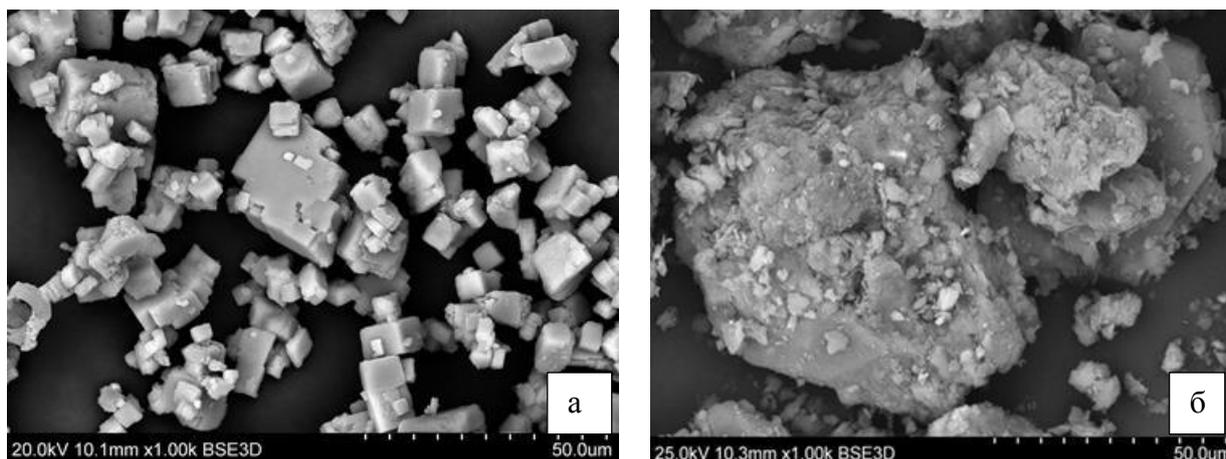


Рисунок 4 – Формы пылевых частиц (степень увеличения 1000 крат): а) от источников предприятия; б) в атмосферном воздухе на границе СЗЗ

Хлориды калия и натрия были определены как маркерные для источника выброса – вещества, по количественному значению которых можно оценить значения прочих веществ, формирующих профиль выброса. Маркерные вещества в дальнейшем были включены предприятием в программу производственного контроля.

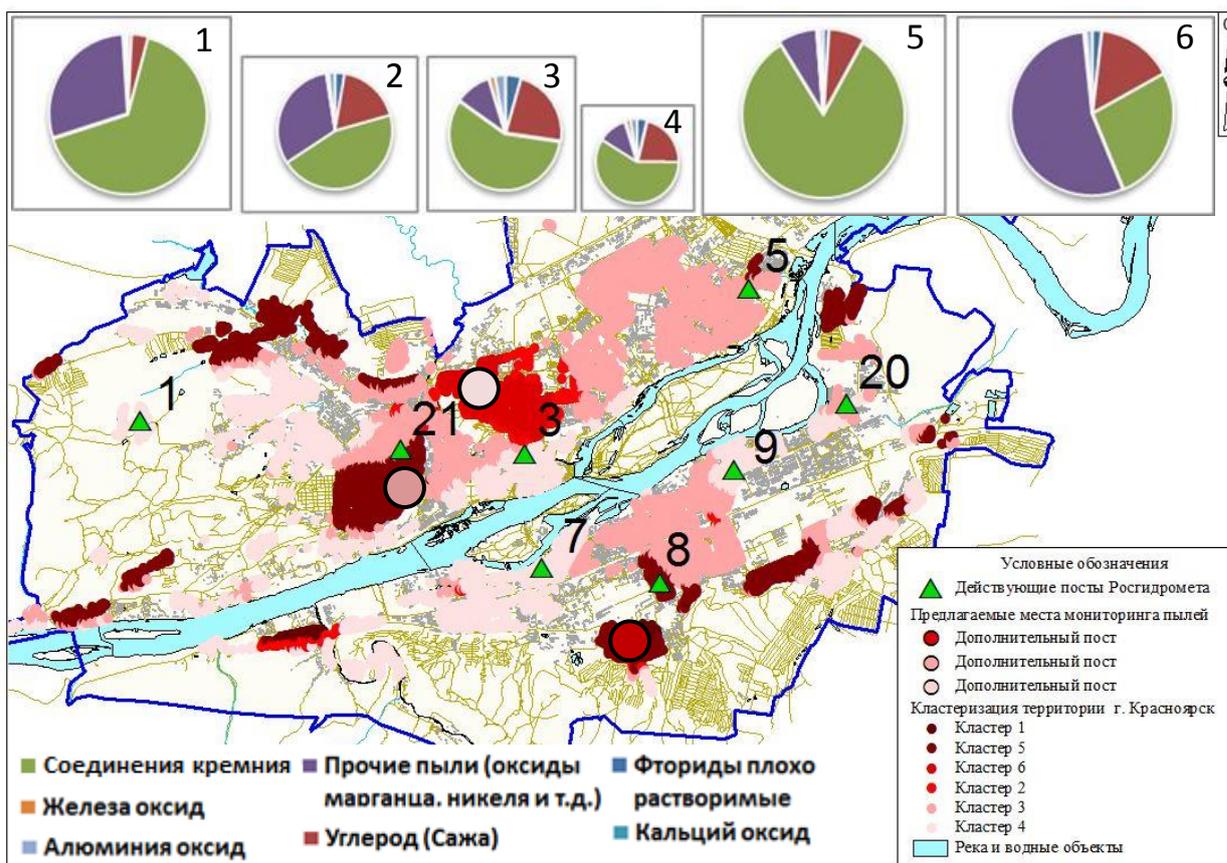
В пятой главе описан предлагаемый алгоритм организации экологического мониторинга на урбанизированных территориях. Пошаговыми элементами алгоритма являлись: геоэкологическое картирование и зонирование территории по структуре и уровням расчетного пылевого загрязнения, оценку рисков для здоровья населения при воздействии твердых частиц; установление основных источников загрязнения через учет профилей выбросов и включение маркерных веществ в программы мониторинга.

Апробация подходов на примере крупного города показала, что на территории города выделяется 6 разнородных зон (кластеров), каждая из которых характеризовалась уровнем (от 0,06 до 0,217 мг/м³), и специфической структурой пылевого загрязнения (рисунок 5).

К примеру, в зоне 3 общий уровень пылевого загрязнения на 57,5% формировался соединениями кремния, на 22,8% углеродом (сажа), на 10,4% прочими веществами. Основными источниками загрязнения являлись объекты теплоэнергетики, автономные источники отопления частных домохозяйств, автотранспортные предприятия. В зоне 6 загрязнение атмосферы определялось 54,6% оксидами меди и никеля, на 26,8% соединениями кремния. Основные источники – предприятия строительной отрасли и крупная фармацевтическая компания. Для каждого кластеры были определены маркерные вещества, характеризующие пылевые выбросы основных источников загрязнения и рекомендуемые для включения в программы мониторинга. Пост мониторинга в каждой зоне рекомендовали размещать в точке максимального риска для здоровья жителей.

На исследованной территории три обоснованных для мониторинга точки практически совпали с местами размещения постов Росгидромета (пост 5, 20, 8). Три поста (1,7, 9) располагались в зоне минимального загрязнения и измерение на них пыли представлялось мало информативным с позиций последующих управленческих решений. Рекомендовано дополнительное включение 3-х точек мониторинга в зонах с высокими уровнями загрязнения и рисков для здоровья населения, не охваченных системным наблюдением.

Предложенная система мониторинга, сопряженная с расчетами рассеивания, позволяет увязывать данные о загрязнении с конкретными источниками выбросов, разрабатывать адекватные воздухоохраные мероприятия, прогнозировать изменение ситуации, оценивать эффективность и результативность принимаемых мер.



● ● ● – уровень пылевого загрязнения в кластере, мг/м^3

Рисунок 5 – Результаты геоэкологического картирования городской территории по уровням и структуре пылевого загрязнения

В главе описаны предложения по совершенствованию системы экологического нормирования выбросов твердых веществ. Сложившаяся в России система государственного регулирования в области охраны окружающей среды, в частности экологического нормирования выбросов, предусматривает, что с января 2019 г. меры, применяются в отношении загрязняющих веществ, входящих в Перечень № 1316-р². Из 106 твердых веществ, которые наиболее часто указываются в составе промышленных выбросов и для которых установлены гигиенические нормативы, в систему государственного регулирования включены 9 видов пылей (взвешенные вещества; PM10, PM2.5, пыль неорганическая с содержанием кремния <20%, 20-70%, >70%, пыль каменного угля, золы твердого топлива и мазута), твердые фториды и 15 соединений металлов. Прочие виды твердых веществ, в том числе сажа, пыль древесная, пыль абразивная, пыль ферросплавов, дижелезо триоксид, оксиды и иные соединения олова, сурьмы и пр. выведены из системы государственного регулирования.

Вместе с тем, установлено, что включение всех видов пылей, а также выделение в их составе мелкодисперсных частиц PM10 и PM2.5 и установление для них нормативов допустимых выбросов будет иметь следствием существенно более жесткие требования к массам выбрасываемых пылевых смесей. Пример результатов приведен в таблице 8.

² Распоряжение Правительства РФ 1316-р от 08.07.2015 г. «Об утверждении перечня загрязняющих веществ, отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды» (с изменениями на 10 мая 2019 года)

Таблица 8 – Расчетная характеристика пылевого загрязнения на границе контрольной территории и обоснование необходимости мероприятий по снижению

Код	Наименование	Максимальная концентрация		Массы выброса предприятия, т/год	Требования к снижению выброса
		доли ПДКм.р.	доли ПДКс.с.		
101	диАлюминий триоксид	–	0.14	1.747	Не требуется
110	диВанадий пентоксид	–	1.62	3.032	Требуется снижение на 0.49 т/год
123	Железа оксид*	–	0.25	23.205	Не требуется
128	Кальций оксид*	0.61	–	1.601	Не требуется
138	Магний оксид	0.06	0.06	0.761	Не требуется
143	Марганец и его соединения	0.25	0.37	2.339	Не требуется
146	Медь оксид**	–	0.28	0.526	Не требуется
184	Свинец и его соединения**	0.19	0.12	0.782	Не требуется
207	Цинк оксид **	–	0.01	0.063	Не требуется
328	Углерод (сажа)*	0.01	0.00	0.820	Не требуется
2909	Пыль неорганическая: до 20% SiO ₂	0.24	0.12	201.695	Не требуется
2936	Пыль древесная*	0.85	–	10.723	Не требуется
2981	Пыль ферросплавов*	1.38	–	8.273	Требуется снижение на 2.28 т/год
8	Взвешенные частицы PM10**	1.96	1.52	42.583	Требуется снижение на 19.34 т/год
10	Взвешенные частицы PM2.5**	1.42	1.12	26.023	Требуется снижение на 14.20 т/год

* вещество не входит в перечень подлежащий государственному регулированию

** вещество не учитывается хозяйствующим субъектом в составе инвентаризации

Тонном выделены вещества, по которым требуется дополнительное снижение выбросов, не предусмотренное существующей системой экологического нормирования.

При существующем подходе к государственному регулированию твердых выбросов предприятию необходимо снизить валовый выброс на 0,49 т/год по диВанадий пентоксиду. Включение в систему государственного регулирования всех видов веществ в твердом агрегатном состоянии, приведет к тому, что предприятие будет обязано выполнить меры по снижению по пыли ферросплавов на 2,28 т/год, по мелкодисперсным частицам – на 19,34 т/год по PM10, в том числе на 14,20 т/год по PM2.5. Такие меры обеспечат соблюдение на границе санитарно-защитной зоны и в жилой застройке всех требований как экологического, так и санитарно-эпидемиологического законодательства страны.

Системное и повсеместное закрепление учета химического и дисперсного состава выбросов и полное включение всех твердых примесей в систему государственного регулирования дополняет и повышает точность оценки воздействия промышленного объекта на атмосферный воздух, обеспечивает эффективное управление пылевыми выбросами и минимизацию рисков для здоровья населения, постоянно проживающего в условиях негативного воздействия твердых частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам исследования компонентного и дисперсного состава пылевых выбросов 75 технологических операций предприятий черной и цветной металлургии, машиностроительной, горнодобывающей и горно-перерабатывающей отраслей определено, что в большинстве случаев выбросы являются многокомпонентными, полидисперсными смесями, содержащими до 80 массовых % оксидов и солей тяжелых

металлов (Pb, Mn, Cu, V, Cr, Ni и др.), до 56 % мелкодисперсных PM10 и до 44 % по PM2.5.

2. Полный учет дисперсного и компонентного состава твердых выбросов в ряде случаев свидетельствует о 2-3 кратном увеличении зоны влияния источников твердых выбросов, по сравнению с установленной без такого учета, и в целом, обеспечивает надежную и адекватную оценку уровня экологической опасности (безопасности) территорий и населения. Для предприятия по первичной переработке алюминия на границе СЗЗ зафиксированы превышения по диАлюминий триоксиду на уровне до 1,3 ПДКс.с. Содержание мелкодисперсных фракций PM10 и PM2.5, в составе выбросов предприятия металлургического профиля, формирует превышения острого и хронического ингаляционного неканцерогенного риска ($HQ > 1$) на уровне до 2,3 HQac по PM10 и 1,7 HQac по PM2.5.

3. Предложенный метод идентификации и количественного определения химического состава и фракционной структуры пылей в атмосферном воздухе, основанный на отборе, микроскопировании проб и анализе состава твердой компоненты с использованием нейросети, компьютерного зрения и библиотек атрибутированных фотографий пылей (более 200 образцов), расширяет возможности оперативного исследования химического и фракционного состава твердых частиц в атмосферном воздухе. Полученные результаты качественного и количественного определения твердых веществ в атмосферном воздухе характеризовались высокой сходимостью по сравнению со стандартными методами измерений.

4. Разработанная методика определения долевых вкладов отдельных химических веществ и источника в целом в загрязнение атмосферного воздуха твердыми частицами, основанная на формировании профилей пылевых выбросов, обеспечивает адекватную и доказательную оценку влияния конкретного объекта на экологическую ситуацию и может лежать в основе выбора маркерных веществ. Доказано, что вклад предприятия горно-перерабатывающего профиля в загрязнение воздуха на границе СЗЗ не превышает 6 %. Основное загрязнение атмосферы формируется маркерными для предприятия веществами – хлоридами калия и натрия.

5. Предложенный и апробированный на примере крупного промышленного города алгоритм выбора точек и формирования программ мониторинга твердых веществ показал достаточность 6 точек для мониторинга пылевого загрязнения и актуальность измерения 6 примесей как маркерных для наиболее значимых источников и вносящих наибольшие вклады в риски для здоровья. Представляется, что алгоритм является универсальным и пригоден для применения на любых урбанизированных территориях.

6. На конкретном примере доказано, что включение в систему государственного экологического нормирования выбросов всех фактически содержащихся в выбросах твердых веществ и учет мелкодисперсных фракций (PM10, PM2.5) приводит к повышению требований по снижению массы твердых компонентов выбросов от 2,3 до 19,3 тонн/год. Подход целесообразно применять ко всем хозяйствующим субъектам, имеющим твердые выбросы, что обеспечит реальное достижение нормативного качества воздуха и экологической безопасности населения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях и в изданиях, приравненных к ним

1. Kokoulin A.N., May I.V., **Zagorodnov S.Yu.**, Yuzhakov A.A. On new methods for measuring and identifying dust microparticles in ambient air / Health Risk Analysis. 2023. no. 1, pp. 36–45. DOI: 10.21668/health.risk/2023.1.04.eng (Scopus).
2. Май И.В., **Загороднов С.Ю.** Идентификация компонентного состава пылевых выбросов как инструмент оптимизации мониторинга и управления качеством атмосферного воздуха/ Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 8. С. 42-47 (Scopus, GeoRef).
3. Май И.В., **Загороднов С.Ю.** Учёт выбросов пылей в системе управления качеством атмосферного воздуха/Гигиена и санитария. 2022. Т. 101. № 6. С. 602-608 (Scopus, Chemical Abstracts).
4. Май И.В., **Загороднов С.Ю.** Экологическое нормирование пылевых промышленных выбросов: проблемы и пути решения/ Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 7. С. 42-47 (Scopus, GeoRef).
5. Май И.В., **Загороднов С.Ю.** Методические подходы к установлению компонентного профиля пылевых выбросов предприятия/ Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 12. С. 39-45 (Scopus, GeoRef).
6. **Zagorodnov S.Y.** Component composition of atmospheric dusts as a characteristic of environmental pollution. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020. С. 72069 (Scopus).
7. May I., **Zagorodnov S.** Predictive estimate of geocological situation based on building up a dust structure profile of industrial emissions. В сборнике: 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Sofia, 2020. С. 255-262 (Scopus).
8. May I., **Zagorodnov S.** Heavy metals in dust emissions from civil engineering and metallurgic enterprises: experience in qualitative and quantitative determination. В сборнике: 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference - SGEM 2020. Conference Proceedings. 2020. С. 169-176 (Scopus).
9. **Zagorodnov S.Yu.**, May I.V. Examining component structure of dust emissions from industrial enterprises as a tool for creating a control and monitoring program. В сборнике: 19th INTERNATIONAL SCIENTIFIC GEOCONFERENCE SGEM 2019. 2019. С. 365-372 (Scopus).
10. May I.V., **Zagorodnov S.Yu.** Dust emissions of industrial enterprises as a factor of negative impact on the agricultural territories. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2019. С. 52079 (Scopus).
11. **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. Т. 98. № 2. С. 142-147 (Scopus, Chemical Abstracts).
12. Власова Е.М., Устинова О.Ю., Носов А.Е., **Загороднов С.Ю.** Особенности заболеваний органов дыхания у плавильщиков титановых сплавов в условиях сочетанного воздействия мелкодисперсной пыли и соединений хлора/Гигиена и санитария. 2019. Т. 98. № 2. С. 153-158 (Scopus, Chemical Abstracts).
13. **Zagorodnov S.Y.**, Kokoulina A.A., Klein S.V. Component, disperse and morphological composition of ambient air dust contamination in the zones of mining-processing enterprises. В сборнике: 8th International Conference on Environmental Science and Technology, ICEST

2017. 8. Сеп. "8th International Conference on Environmental Science and Technology, ICEST 2017" 2017. С. 012004 (Scopus).

14. **Zagorodnov S.Y.**, Kokoulina A.A., Popova E.V. Study of component composition and particle size distribution of dust emissions to solve the problems of environmental quality management/WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2014. Т. 183. С. 225-231 (Scopus).

15. Май И.В., **Загороднов С.Ю.** Обоснование программы производственного контроля пыли на границе санитарно-защитной зоны с учетом профиля выбросов предприятия/Медицина труда и промышленная экология. 2017. № 11. С. 45-49 (Web of Science, Chemical Abstracts).

16. **Загороднов С.Ю.**, Кокоулина А.А., Попова Е.В. Изучение компонентного и дисперсного состава пылевых выбросов предприятий металлургического комплекса для задач оценки экспозиции населения / Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 5-2. С. 451-456.

17. Май И.В., **Загороднов С.Ю.**, Попова Е.В. Оценка экспозиции населения к пылевому фактору с учетом компонентного и дисперсного состава выбросов предприятия по добыче и переработке минерального сырья (дискуссия)/Медицина труда и промышленная экология. 2014. № 12. С. 35-39 (Scopus, Chemical Abstracts).

18. Май И.В., Макс А.А., **Загороднов С.Ю.**, Чигвинцев В.М. Методические подходы к учёту скорости оседания различных пылевых фракций для задач оценки экспозиции населения мелкодисперсными частицами/Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 5-3. С. 791-794.

19. Май И.В., **Загороднов С.Ю.**, Макс А.А. Фракционный и компонентный состав пыли в воздухе рабочей зоны машиностроительного предприятия / Медицина труда и промышленная экология. 2012. № 12. С. 12-15 (Scopus, Chemical Abstracts).

20. Зайцева Н.В., Май И.В., Макс А.А., **Загороднов С.Ю.** Анализ дисперсного и компонентного состава пыли для оценки экспозиции населения в зонах влияния выбросов промышленных стационарных источников / Гигиена и санитария. 2013. Т. 92. № 5. С. 19-23 (Scopus).

Свидетельства о регистрации баз данных

21. Май И.В., Клейн С.В., Вековшинина С.А., **Загороднов С.Ю.**, Кокоулина А.А., Попова Е.В., Ситчихина Л.А., Никифорова Н.В., Волкова М.В. Пыли промышленных производств. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2016620004, 11.01.2016. Заявка № 2015621372 от 06.11.2015.

22. Зайцева Н.В., Май И.В., Клейн С.В., Балашов С.Ю., **Загороднов С.Ю.**, Вековшинина С.А., Попова Е.В., Андришунас А.М., Ситчихина Л.А. Расчетный уровень пылевого воздействия стационарных источников выбросов в точках жилой застройки крупного промышленного центра. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2021622129, 12.10.2021. Заявка № 2021622022 от 05.10.2021.

Прочие работы по теме диссертации

23. I.V. May, **S. Yu. Zagorodnov** Dust Discharge Profile as a Tool to Improve the Objectivity of Atmospheric air Monitoring in Areas Affected by Industrial Enterprises. Proceedings of the International Symposium «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). DOI: <https://doi.org/10.2991/isees-19.2019.29>.

24. **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 (30). С. 124-133.