

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет
Государственной противопожарной службы МЧС России»

На правах рукописи

Невмержицкий Николай Владимирович

**Методика оценки и прогнозирования экстремального загрязнения
воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами
 PM_{10} и $PM_{2.5}$**

05.26.02 – безопасность в чрезвычайных ситуациях (транспорт)

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: к.х.н., доцент
Ложкина Ольга Владимировна

Санкт-Петербург
2016

Оглавление

Введение.....	5
1 Аналитический обзор.....	11
1.1 Опасное влияние взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ на здоровье населения.....	11
1.1.1 Понятие «взвешенные частицы» и их классификация.....	11
1.1.2 Токсикологическая характеристика пылевидных загрязняющих веществ....	16
1.2 Чрезвычайное загрязнение городской среды мегаполисов мелкодисперсными взвешенными частицами и роль автотранспорта в этом процессе	22
1.3 Характеристика автотранспорта как источника поступления PM_{10} и $PM_{2.5}$ в атмосферный воздух городов.....	28
1.3.1 Различные аспекты проявления негативного воздействия автомобильного транспорта на человека и окружающую среду	28
1.3.2 Состояние нормирования и контроля выбросов вредных веществ в атмосферу от автотранспортных средств в Российской Федерации и за рубежом	29
1.3.3 Современные российские методики оценки и прогнозирования выбросов вредных веществ от автотранспортных средств. Их недостатки в части определения пылевидных продуктов, образующихся при транспортном процессе	31
1.4 Выводы по обзору	32
2 Экспериментально-расчетные исследования уровня загрязнения воздуха взвешенными частицами на автомагистралях Санкт-Петербурга	35
2.1 Методы и средства измерения пылевидных продуктов.....	35
2.2 Объекты исследования, условия дорожных экспериментов	39
2.3 Результаты натурных обследований автотранспортных потоков.....	43
2.4 Результаты исследования концентрационного состава мелкодисперсных аэрозолей вблизи автомобильных дорог.....	47

2.5 Результаты исследования дисперсного состава взвешенных частиц в придорожном воздухе	66
2.6 Выводы по разделу	70
3 Оценка взаимосвязи концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ в придорожном воздухе и гидрометеорологических параметров методом корреляционно-регрессионного анализа	72
3.1 Корреляционный анализ	72
3.2 Регрессионный анализ	80
3.3 Выводы по разделу	88
4 Расчетная методика для прогнозирования и мониторинга экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$ с оценкой вклада разных источников	89
4.1 Определение факторов эмиссии взвешенных частиц, поступающих в результате износа тормозных колодок	92
4.2 Определение факторов эмиссии взвешенных частиц, поступающих в результате износа покрышек автомобильных шин	96
4.3 Определение факторов эмиссии взвешенных частиц, поступающих в результате износа дорожного полотна	99
4.4 Обоснование физической модели переноса ВЧ в окрестностях автодорог	104
4.5 Выводы по разделу	110
5 Расчетное исследование экстремального загрязнения придорожного воздушного слоя взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$ вблизи ряда автомагистралей Санкт-Петербурга с интенсивным движением	111
Заключение	116
Список сокращений и условных обозначений	120
Список литературы	123

Приложение А Стандарты Евро 1 - Евро 6.....	146
Приложение Б Полевой журнал.....	149
Приложение В Акты о внедрении результатов исследования	150

Введение

Актуальность темы исследования. Высокие темпы автомобилизации населения Российской Федерации в течение последнего десятилетия привели к тому, что автомобильный транспорт стал приоритетным источником загрязнения атмосферного воздуха на урбанизированных территориях. При сочетании неблагоприятных метеорологических, транспортных и градостроительных условий в черте города формируется экстремально высокое загрязнение воздуха опасными поллютантами, выделяющимися с отработавшими газами автомобилей. Такие эпизоды наблюдаются редко, но могут быть приравнены к чрезвычайным ситуациям по степени опасности воздействия на население и окружающую среду, так как концентрации превышают предельно допустимые значения. Одними из наиболее опасных токсикантов, поступающих в воздух при эксплуатации автотранспорта, являются взвешенные частицы PM_{10} и $PM_{2.5}$, которые представляют серьезную угрозу здоровью населения, поскольку способны адсорбировать на своей поверхности токсичные и канцерогенные вещества и, благодаря микроразмерам, проникать в кровеносную систему человека, повышая риск бронхо-легочных, сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний.

Методологическое обеспечение мониторинга и прогнозирования ЧС подобного типа сдерживается, по сути, отсутствием экспериментально-расчетных методик для оценки выбросов ВЧ от автотранспорта, учитывающих одновременно сажевые частицы, выделяющиеся с отработавшими газами (ОГ) двигателей автомобилей, и ВЧ, образующиеся в результате истирания шин, тормозных колодок, дорожного полотна и вторичной взвеси, генерируемой движущимся автотранспортом, а также недостаточной изученностью физического механизма пылепереноса и распространения пыли на автодорогах, что, в совокупности, не позволяет объективно оценивать и прогнозировать экстремально высокое загрязнение воздуха в городах PM_{10} и $PM_{2.5}$. Выше обозначенные проблемы определили актуальность диссертационного исследования.

Тема диссертации связана с основами государственной политики в области обеспечения безопасности населения Российской Федерации, соответствует целям и задачам, изложенным в Докладе министра Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий В.А. Пучкова «О долгосрочных перспективах развития системы МЧС России (МЧС-2030)», и отвечает принципу обеспечения безопасности жизнедеятельности населения – переходу от оперативного реагирования к управлению рисками, профилактике и предупреждению чрезвычайных ситуаций.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиям фундаментальных проблем загрязнения воздуха взвешенными частицами, а также методам и технологиям его оценки и снижения посвящены труды Ивлева Л.С., Sutton O.G., Азарова В.Н., Юнге Х, Гениховича Е.Л., Оникула Р.Я., Яковлевой Е.А. и других ученых. Изучением чрезвычайных ситуаций, связанных с экстремально высоким загрязнением атмосферного воздуха городов мелкодисперсными аэрозольными частицами, и вопросов опасного воздействия PM_{10} и $PM_{2.5}$ на организм человека занимаются Pope C.A., Dockery D.W., Jerrett M., Burnett R.T., Zhang J., Heinzerling A., Shimizu E., Hao H., Chang H.H., Фридман К.Б., Лим Т.Е. и др. В Российской Федерации накоплен значительный опыт в исследовании негативного воздействия автотранспорта на качество атмосферного воздуха, а также в разработке научно обоснованных методологий его мониторинга и прогнозирования (Ложкин В.Н., Донченко В.К., Хватов В.Ф., Буренин Н.С., Ложкина О.В., Волкодаева М.В. и др.), однако вопросы загрязнения воздушной среды (в том числе и экстремально высокого) вблизи автомагистралей мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$, эмитируемыми при транспортном процессе, практически не изучались, в отличие от зарубежных стран, где данные проблемы уже давно исследуются (Kukkanen J., Kupiainen K., Samaras Z., Sokhi R., Ntziachristos L., Boulter P., Harrison R.M., Amato F.).

Цель исследования – разработать методику оценки и прогнозирования экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях взвешенными частицами

PM_{10} и $PM_{2.5}$ с оценкой вклада сажевых частиц, продуктов износа шин, тормозных колодок, дорожного полотна и вторичной взвеси.

Задачи исследования:

1. Провести экспериментальные исследования уровня загрязнения воздуха взвешенными частицами на автомагистралях Санкт-Петербурга с оценкой дисперсного состава при разных метеорологических и дорожных условиях; методом корреляционно-регрессионного анализа получить зависимости концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ от гидрометеорологических параметров и интенсивности автотранспортных потоков.

2. Разработать расчетную методику для прогнозирования и мониторинга экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$ с оценкой вклада сажевых частиц, продуктов износа шин, тормозных колодок, дорожного полотна, наносных частиц и вторичной взвеси; обосновать физическую модель переноса ВЧ и выявить закономерности их пространственного распространения в окрестностях автодорог.

3. Выполнить расчетные исследования по оценке концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ в придорожном воздушном слое вблизи ряда автомагистралей Санкт-Петербурга и определить условия и закономерности высокого и экстремально высокого уровня загрязнения придорожной воздушной среды мелкодисперсными взвешенными частицами.

Научная новизна:

1. Впервые посредством экспериментальных измерений исследован концентрационный и дисперсный состав взвешенных частиц в воздушной среде вблизи автомагистралей, на основании результатов которых методом корреляционно-регрессионного анализа осуществлена оценка влияния гидрометеорологических параметров (влажности, температуры воздуха, скорости ветра) и интенсивности движения на уровень загрязнения приземной атмосферы взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$.

2. Впервые разработана расчетная методика для прогнозирования и мониторинга экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$ с оценкой вклада сажевых частиц, продуктов износа шин, тормозных колодок, дорожного полотна и вторичной взвеси; обоснована физическая модель переноса ВЧ в окрестностях автомагистралей.

3. Впервые выполнены расчетные исследования по оценке концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ в придорожном воздушном слое вблизи ряда автомагистралей Санкт-Петербурга, определены условия и выявлены закономерности опасно высокого уровня загрязнения воздуха мелкодисперсными взвешенными частицами.

Теоретическая значимость работы. Методом корреляционно-регрессионного анализа выявлены закономерности влияния гидрометеорологических параметров и интенсивности движения автотранспортных потоков на содержание PM_{10} и $PM_{2.5}$ в придорожной воздушной среде, а также теоретически обоснована применимость физико-математической модели распространения загрязняющих веществ в приземной атмосфере для прогнозирования ситуаций опасно высокого загрязнения воздуха взвешенными частицами.

Практическая значимость работы. Разработана методика оценки и прогнозирования загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$, генерируемыми при транспортном процессе, позволяющая с высокой степенью практической достоверности осуществлять мониторинг и прогнозирование высокого и экстремально высокого загрязнения приземной атмосферы чрезвычайно опасными мелкодисперсными взвешенными частицами вблизи городских автодорог и скоростных автомагистралей.

Методы исследования: физико-математические методы анализа распространения ВЧ в атмосферном воздухе, экспериментальные методы анализа концентрационного и дисперсного состава взвешенных частиц, корреляционно-регрессионный анализ, натурные эксперименты по определению характеристик

автотранспортных потоков, вычислительные исследования с использованием математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования концентрационного и дисперсного состава взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ вблизи ряда автомагистралей Санкт-Петербурга при разных погодных условиях; результаты исследования влияния гидрометеорологических параметров (влажности, температуры воздуха, скорости ветра) и интенсивности движения на уровень загрязнения воздуха взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$ методом корреляционно-регрессионного анализа.

2. Расчетная методика для прогнозирования и мониторинга экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$ с оценкой вклада сажевых частиц, продуктов износа шин, тормозных колодок, дорожного полотна и вторичной взвеси; обоснование физической модели переноса ВЧ в окрестностях автомагистралей.

3. Результаты численных исследований загрязнения придорожного воздуха PM_{10} и $PM_{2.5}$ с использованием разработанной методики, определение условий опасно высокого уровня загрязнения придорожной воздушной среды мелкодисперсными взвешенными частицами с идентификацией вклада разных источников.

Достоверность основных положений диссертационного исследования обоснована применением широко апробированных в предметной области исследования теоретических представлений о механизмах распространения ВЧ в воздухе, подтверждена полнотой результатов экспериментальных исследований, соответствием расчетных значений приземных концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ данным собственных измерений и измерений автоматической системы мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга, использованием поверенного аналитического оборудования, а также согласованностью полученных результатов с аналогичными данными авторитетных научных школ.

Апробация результатов.

Основные результаты диссертационного исследования доложены и обсуждены на Международной научно-практической конференции «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Вопросы обеспечения комплексной безопасности деятельности в Арктическом регионе» (Санкт-Петербург, СПбУГПС МЧС России, 2014); 6-ой международной научно-практической конференции «Измерения в современном мире – 2015» (Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2015); на Юбилейной международной научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы – 2015» (Санкт-Петербург, ИПТ РАН, 2015); на 10-ой международной конференции «Качество воздуха: наука и практика» (Милан, Италия, 2016); на VII Международном форуме «Экология» (Санкт-Петербург, 2016); на Международном объединенном симпозиуме по измерениям «ИМЕКО TC1-TC7-TC13» (Университет Калифорнии, Беркли, США, 2016).

Реализация результатов исследования. Основные результаты научных исследований использованы в «Методике определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов» (Санкт-Петербург, ОАО «НИИ Атмосфера», 2010), рекомендованы для уточнения «Методики определения выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух от автотранспортных потоков, движущихся по автомагистралям Санкт-Петербурга», утвержденной распоряжением Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности правительства Санкт-Петербурга, а также применяются в образовательном и научно-исследовательском процессах ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России».

Публикации: по теме диссертации опубликовано 10 статей, из них одна статья опубликована в рецензируемом научном издании, индексируемом в международных базах научного цитирования Scopus и Web of Science, три статьи – в изданиях из перечня ВАК Минобрнауки РФ.

1 Аналитический обзор

1.1 Опасное влияние взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ на здоровье населения

В Российской Федерации (РФ), в странах Европейского Союза (ЕС) и Соединенных Штатах Америки (США) в течение последнего десятилетия качество атмосферного воздуха улучшилось, благодаря совершенствованию законодательного регулирования и внедрению технологий снижения выбросов загрязняющих веществ на транспорте, промышленных объектах, топливно-энергетических предприятиях [1-4]. Однако имеются убедительные доказательства того, что наблюдающиеся сегодня уровни загрязнения атмосферы оксидами азота (NO_x), взвешенными частицами (ВЧ или PM), озоном (O_3), оксидом серы (SO_2), формальдегидом, полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) по-прежнему представляют значительную угрозу для окружающей среды и здоровья человека [5]. Масштабные исследования влияния взвешенных частиц на загрязнения воздуха в городах, их негативное воздействие на здоровье населения, на природные экологические системы, флору, фауну, объекты техносферной инфраструктуры содействовали пересмотру требований к качеству воздуха по содержанию ВЧ в атмосфере городов [5]. Всемирная Организация Здравоохранения в 2005 г. отнесла взвешенные частицы к приоритетным поллютантам воздуха наравне с NO_x , O_3 , SO_2 , формальдегидом, ПАУ.

1.1.1 Понятие «взвешенные частицы» и их классификация

Термин «взвешенные частицы» относится к твердым или жидким веществам, диспергированным в газовой фазе. Для их обозначения в сокращенном виде используются две аббревиатуры ВЧ или PM – производное от английского словосочетания «Particulate Matter». По сложившейся традиции в метеорологии, физике атмосферы, химической экологии к ВЧ относят, в основном, твердые частицы [6-14]. Твердые частицы в дисперсных системах

могут образовываться в результате процессов измельчения, конденсации, различных химических реакций или в результате высыхания растворов (морские пыли) [6]. Под воздействием газовых или воздушных потоков они переходят во взвешенное состояние и образуют то, что и принято называть «взвешенными частицами».

Для обозначения отдельных видов ВЧ, в зависимости от размеров, формы и характерных особенностей поведения, используют такие термины, как пыль, аэрозоль, сажа, дым.

Пыль представляет собой дисперсную систему с газообразной дисперсионной средой и твердой дисперсной фазой, которая состоит из частиц, по размерам находящихся в диапазоне от близких к молекулам до видимых невооруженным глазом (примерно от 0.001 до 100 мкм) и обладающих свойством находиться во взвешенном состоянии более или менее продолжительное время [6, 7, 14, 15].

В соответствии с современными представлениями под аэрозолем понимается дисперсная система, состоящая из мелких твердых или жидких частиц, взвешенных в газовой фазе, обычно, в воздухе. Скорость оседания частиц аэрозоля незначительна, поэтому они продолжительное время витают в воздухе. Наиболее тонкие из них по размерам приближаются к молекулам, а наиболее крупные достигают 0.2-2.5 мкм. Понятие грубый аэрозоль с твердой дисперсной фазой зачастую отождествляется с пылью [6, 7, 14, 15].

Взвешенные частицы можно классифицировать по ряду характерных признаков, например, по происхождению, размеру, форме, способу генерации (таблица 1).

Таблица 1 – Классификация взвешенных частиц и примеры.

Признак	Условное название	Разновидности и примеры
По происхождению		
Естественного происхождения	Природные	Минеральные (неорганические): песчаные бури, выветривание горных пород, вулканическая деятельность, испарения с поверхностей морей и океанов. Смешанные: эрозия почв, лесные, степные и торфяные пожары. Органические: пылеобразные вещества растительного происхождения, пыльца растений микроорганизмы, споры грибов.
Антропогенного происхождения	Техногенные	ВЧ, образующиеся при сжигании разных видов топлива (т.е. от топливно-энергетического комплекса (ТЭК) и транспортного комплексов), при проведении дорожных и строительных работ, добыче полезных ископаемых, производстве бетона, цемента, кирпича и т.д., плавильное производство
Первичные	Первичные РМ	Частицы, непосредственно поступающие в воздух как от природных, так и от техногенных источников
Вторичные	Вторичные РМ	Частицы, образующиеся в атмосфере в результате химических преобразований газообразных компонентов: SO_2 , NO_x , NH_3 , неметановых летучих органических соединений (ЛОС). В основном, антропогенного происхождения (автомобильный транспорт, ТЭК)
По размеру [14, 15]		
Мелкодисперсные ($r \leq 0,25$ мкм)	Тонкодисперсные, субмикронные или субмикроскопические аэрозоли	Дымовые частицы, частицы сажи (дымка, смог)
Среднедисперсные ($0,25 \text{ мкм} < r < 10 \text{ мкм}$)	Микроскопические аэрозоли	Дымовые частицы, частицы сажи,

Признак	Условное название	Разновидности и примеры
Грубодисперсные (> 10 мкм*)	Гигантские аэрозоли	Пылевые бури
Признак	Условное название	Разновидности и примеры
По форме**		
Изометрические	Шаровидные	Приблизительно одинаковые размеры в трех направлениях: частицы сажи, кремнезема
Пластинчатые	Чешуйчатые	Размер в одном из направлений гораздо меньше, чем в других:
Волокнистые	Цепочечные	Вытянутые (протяженные) в одном направлении: асбестовая, стеклянная, металлическая и растительная пыль
По способу генерации		
Дисперсионные		Образуются в результате механического диспергирования твердых веществ и последующего рассеивания в воздухе мелкодисперсных частиц. Как правило, такие частицы имеют относительно большой размер (> 10 мкм) и неправильную форму.
Конденсационные		Образуются при горении или возгонке веществ, т.е. при переходе из газообразного в твердое состояние (частицы сажи, например), а также в результате фотохимических реакций в атмосфере с участием SO_2 , NO_x , NH_3 , неметановых ЛОС. Это, как правило, мелкодисперсные частицы, диаметром $\leq 0,25$ мкм.

Примечания: * Х. Юнге для атмосферных аэрозолей полагал верхнюю границу размеров равной 10 мкм [12]. Для частиц вулканической пыли, пылевых и пыле-песчаных бурь эту границу следует отодвинуть до 100 мкм [13]. ** Классификация частиц по форме весьма условна, поскольку твердые аэрозольные частицы, в основном, имеют несферическую форму.

В связи с тем, что в реальных условиях крайне редко встречаются частицы сферической формы, было введено понятие эквивалентного аэродинамического диаметра – это диаметр сферической частицы плотностью 1 г/см^3 , обладающей определенной скоростью оседания и временем витания в поле тяжести Земли. Тогда любая другая частица, отличной формы, размеров и плотности, но характеризующаяся такой же скоростью оседания и временем витания, будет условно приниматься за частицу такого же диаметра, иными словами, пластинчатая частица небольшой плотности длиной 50 мкм будет приниматься при проведении расчетов за сферическую частицу диаметром 5 мкм, если их время оседания будет одинаковым. Такой подход оправдал себя при оценке переноса аэрозольных частиц в атмосферном воздухе на большие расстояния. Особенностью взвешенных частиц является сильное отличие их плотности от исходных веществ.

Важнейшими свойствами дисперсных образований, определяющими особенности физических и химических процессов в атмосфере, протекающих с их участием, а также токсические свойства ВЧ, являются высокая удельная поверхность дисперсной фазы, достигающая сотен квадратных метров на грамм диспергированного вещества [17, 18] и значительное время витания в воздушной среде [19]. ВЧ диаметром от 1 до 10 мкм могут витать в воздухе несколько суток, время витания в воздухе для частиц размером менее 1 мкм составляет 10-20 дней, а ВЧ диаметром менее 0.1 мкм не осаждаются, поскольку скорость их броуновского движения превышает скорость осаждения [19].

Кроме того, в отличие от остальных загрязнителей атмосферного воздуха: оксидов азота NO_x , угарного газа CO , озона O_3 , оксида серы SO_2 , – каждое из которых представляет собой одно химическое вещество известного состава, взвешенные частицы являются совокупностью разнообразных химических соединений. ВЧ могут включать химически инертные компоненты, например, углерод C , оксид кремния SiO_2 , и высоко реакционноспособные вещества: окислители, сульфат- и нитрат-ионы, металлы в нативной форме и в виде ионов в составе солей, продукты частичного окисления углеводородов (альдегиды,

кетоны, полициклические ароматические соединения), биологические компоненты (мелкодисперсные частицы гумуса, бактерии, споры грибов и пр.). Разнообразие химического состава и размеров ВЧ обусловило некоторые трудности при оценке их токсичности [20, 21].

1.1.2 Токсикологическая характеристика пылевидных загрязняющих веществ

Научно-исследовательские работы по изучению негативного воздействия ВЧ на здоровье население ведутся как за рубежом [22-42], так и в РФ [42-48]. Уже к 1970-ым годам была установлена связь между риском развития бронхо-легочных и сердечно-сосудистых заболеваний и высоким уровнем содержания ВЧ в воздухе, результаты этих исследований отражены в обзорных статьях Seaton [22], Pope [23] и Dockery [24]. В конце 1990-ых – начале 2000-ых у специалистов, а к этому времени было уже опубликовано около 150 научных исследований, не было сомнений о влиянии ВЧ на преждевременную смертность [22, 23], собственно, эти работы и послужили основой для введения ПДК для PM_{10} в воздухе в США и в Евросоюзе в конце 1990-ых годов.

В современных работах продолжают исследования связи острых и хронических заболеваний сердечно-сосудистой и бронхолегочной систем как среди населения, относящегося к группе риска (дети, беременные женщины, пожилые люди и люди, страдающие астмой, аллергическими ринитом и бронхитом, а также сердечно-сосудистыми заболеваниями), так и среди здорового взрослого населения [25-41]. Анализ работ [25-41] позволяет сделать выводы о том, что 1) при длительном хроническом воздействии прогрессирует хроническая обструкция легких; 2) краткосрочное острое воздействие усугубляет болезни легких; 3) токсическое действие проявляется в системном окислительном стрессе легких, воспалении и атеросклерозе сосудов; 3) наблюдаются неблагоприятные изменения в автономной функции сердца; 4) наблюдаются изменения тонуса сосудов и функции эндотелия; 5) транслокация ВЧ провоцирует

протромботические эффекты; 6) имеет место снижение защитных сил организма и иммунитета; 7) наблюдается снижение функции легких, респираторный дистресс-синдром, и гипоксия.

Также хочется выделить исследования, проводимые в нашей стране [42-48]. Работы Фридмана и Лим [42-45] посвящены разработке научно-методических основ комплексной гигиенической оценки влияния автотранспорта на здоровье населения мегаполиса (на примере Санкт-Петербурга), с использованием оценки риска для здоровья. Установлено, что такие поллютанты, как формальдегид, ВЧ, NO_x , CO и SO_2 , повышают риск развития хронических и острых заболеваний органов дыхания (вклад – 48 %), крови и кроветворных органов (вклад – 25 %) и смертности (вклад – 25 %) у населения, проживающего вблизи автодорог. Приоритетными нозологическими группами по силе связи с уровнем загрязнения атмосферного воздуха для детей в возрасте 0 - 14 лет являются болезни крови и кроветворных органов, для подростков (15 - 17 лет) и взрослых (18 – 60 лет) болезни органов дыхания. Установлено наличие причинно-следственной связи между уровнями загрязнения атмосферного воздуха и заболеваемостью болезнями органов дыхания по 4-м веществам: взвешенные вещества ($0.36 \leq \text{rcp} \leq 2.42$; $m=0.05$; $t = 20.16$), формальдегид ($0.23 \leq \text{rcp} \leq 2.29$; $m=0.06$; $t=15.64$), свинец ($0.07 \leq \text{rcp} \leq 2.13$; $m=0.08$; $t=11.34$) и бензол ($0.31 \leq \text{rcp} \leq 1.75$; $m=0.16$; $t=5.24$).

В статье [46] описываются результаты взаимосвязи заболеваемости воспитанников семи детских садов города Биробиджана и уровня загрязнения приземной атмосферы взвешенными частицами, который оценивался косвенно с использованием метода индикации снежного покрова на территории обследуемых детских садов. Оценка частоты и характера заболеваемости детей проводилась посредством анализа медицинских карт, всего было проанализировано 869 карт. Исследование показало, что дети, посещающие дошкольные учреждения, расположенные в непосредственной близости от автодорог с интенсивным движением легкового и грузового транспорта, болеют ОРВИ и бронхитами в 1.5-2 раза чаще, чем дети из детских садов, находящихся в экологически благополучных районах.

В работах [47] и [48] приводятся результаты исследования ВЧ техногенной природы (от котельных и автотранспорта) на развитие и распространенность болезней органов дыхания у детей и системы кровообращения среди взрослого населения г. Кирова. Было установлено, что в районах города с высоким загрязнением воздушного бассейна ВЧ отмечается статистически значимый ($p < 0.05$), по сравнению с контрольным районом, высокий уровень заболеваемости детей болезнями органов дыхания: относительный риск развития хронического фарингита, назофарингита, синусита и ринита равен 1.98, – а бронхиальной астмы – 0.18 [47]. Первичная заболеваемость и распространенность в этих районах болезней системы кровообращения среди взрослых также высока: величины относительного риска развития сердечно-сосудистых заболеваний составили для болезней, характеризующихся повышенным кровяным давлением, 1.26–3.07, цереброваскулярных болезней – 1.13–1.67, ишемической болезни сердца – 1.25–1.85 [48].

В результате многочисленных исследований отрицательного воздействия взвешенных частиц на здоровье населения, проводимых повсеместно в мире в течение последних 30 лет, было статистически достоверно установлено, что их токсичность определяется не только химическим составом, но и размерами [5]. По имеющимся оценкам, при каждом увеличении концентрации PM_{10} на 10 мкг/м^3 суточная смертность возрастает на 0.2–0.6%, а каждое повышение концентрации $PM_{2.5}$ на 10 мкг/м^3 сопряжено с ростом долговременного риска кардиопульмональной смертности на 6–13% [5].

Поэтому в токсикологии выделяют на настоящий момент 3 группы частиц, отличающихся по степени негативного эффекта на здоровье людей: грубодисперсные с аэродинамическим диаметром более 10 мкм (вызывают раздражение слизистых оболочек верхних дыхательных путей и глаз, провоцируя кашель, першение в горле, аллергические реакции, зуд и покраснение глаз) – не нормируются; среднелдисперсные частицы с аэродинамическим диаметром менее

10 мкм PM_{10} - нормируются, и более токсичные мелкодисперсные частицы с аэродинамическим диаметром менее 2.5 мкм $PM_{2.5}$ - нормируются.

Частицы PM_{10} и $PM_{2.5}$ относятся к респирабельным, т.е. их диаметр настолько мал, что они способны проникать в торакальный отдел дыхательной системы человека и в кровеносное русло [5, 21-48]. Негативное влияние респирабельных ВЧ проявляется как при кратковременной экспозиции в течение нескольких часов или дней, так и при долговременной, т.е. хронической экспозиции (в течение нескольких месяцев или лет).

Критерии качества атмосферного воздуха в отношении предельно-допустимого содержания PM_{10} и $PM_{2.5}$ в РФ, странах ЕС, США и Китае несколько различаются (Табл. 2). В нормативных стандартах ЕС, США и Китая не применяется оценка максимально-разового содержания PM_{10} и $PM_{2.5}$ за двадцатиминутный интервал, концентрации ВЧ измеряются со среднечасовым осреднением. Это говорит о том, что риск острого воздействия ВЧ на здоровье населения оценивается по степени загрязнения воздуха относительно среднесуточной ПДК, а хронического воздействия - по степени загрязнения воздуха относительно среднегодовой ПДК.

В своей природоохранной политике страны Европейского Союза, придерживаются рекомендаций ВОЗ. В ЕС показатель предельно допустимого содержания взвешенных частиц PM_{10} был впервые установлен в 1999 году в Директиве 1999/30/ЕС [49], а в 2008 году была уточнена ПДК PM_{10} и установлена ПДК для $PM_{2.5}$ в Директиве 2008/50/ЕС «О качестве атмосферного воздуха и чистого воздуха для Европы» [50] – таблица 2.

В США среднесуточные и среднегодовые нормативные значения содержания PM_{10} в воздухе были впервые введены в 1987 году и составили 150 и 50 мкг/м³, соответственно [51]. В 2006 году действующие нормативы были пересмотрены: среднегодовая ПДК для PM_{10} была отменена, но при этом были введены среднесуточная и среднегодовая ПДК для $PM_{2.5}$, равные 35 и 15 мкг/м³, соответственно. В 2012 нормативы были еще раз дополнены: впервые появились так называемые первичные и вторичные стандарты (таблица 2). Первичные

стандарты обеспечивают, в первую очередь, защиту здоровья уязвимых групп населения: астматиков, детей и пожилых людей. Вторичные стандарты обеспечивают защиту общественного благосостояния, в том числе защиту от пониженной видимости и нанесения ущерба здоровью животных, сельскохозяйственным культурам, растительности, зданиям и сооружениям (таблица 2) [51].

В РФ предельно-допустимые концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ в воздухе населенных мест были утверждены гигиеническими нормативами ГН 2.1.6.2604-10 «Дополнение №8 к ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест»», которые были введены в действие 21 июня 2010 года [52]. Нормативные значения приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Нормативные значения содержания PM_{10} и $PM_{2.5}$ в воздухе.

Показатель*	ВОЗ	РФ	ЕС	США	Китай
$ПДК_{PM_{2.5}MP}, \text{мкг/м}^3$	-	160	-	-	-
$ПДК_{PM_{2.5}CC}, \text{мкг/м}^3$	25	35	25	35	35
$ПДК_{PM_{2.5}CG}, \text{мкг/м}^3$	10	25	12	12** 15***	15
$ПДК_{PM_{10}MP}, \text{мкг/м}^3$	-	300	-	-	-
$ПДК_{PM_{10}CC},$	50	60	50****	150*****	50
$ПДК_{PM_{10}CG}, \text{мкг/м}^3$	20	35	20	-	40

Примечания: * $ПДК_{PM_{2.5}MP}$ и $ПДК_{PM_{10}MP}$ – допустимые максимально-разовые концентрации в воздухе частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} , мкг/м^3 (20-минутное осреднение); $ПДК_{PM_{2.5}CC}$ и $ПДК_{PM_{10}CC}$ – допустимые среднесуточные концентрации в воздухе частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} , мкг/м^3 (24-часовое осреднение); $ПДК_{PM_{2.5}CG}$ и $ПДК_{PM_{10}CG}$ допустимые среднегодовые концентрации в воздухе частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} , мкг/м^3 (годовое осреднение); **Первичный стандарт (объяснение см. в тексте); ***Вторичный стандарт (объяснение см. в тексте); ****Показатель не может быть превышен более 35 раз в году; *****Показатель не может быть превышен более 1 раза в году.

Анализ приведенных нормативов позволяет сделать вывод о том, что в РФ среднегодовая ПДК для $PM_{2.5}$ в 2.5 раза превышает значение, рекомендованное ВОЗ, и в 2 раза предельные значения, установленные в ЕС и США. Наличие максимально-разовых ПДК в отношении частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ в российских

гигиенических нормативах представляется весьма спорным, поскольку ВЧ, в большинстве случаев, не оказывают мгновенного острого токсического действия в течение короткого времени экспозиции (до 20-ти минут), но при этом ПДК_{м.р.} в 4.7 раз превышает ПДК_{с.с.} и в 6.4 раза – ПДК_{с.г.}. Тем не менее, установление данных гигиенических нормативов позволяет четко определять местные фоновые концентрации и предъявлять требования к предприятиям по нормированию качества воздушной среды санитарно-защитных, жилых зон, а также получать информацию по состоянию качества воздуха в городах и регионах РФ.

Следует отметить, что ВОЗ признала, что наиболее опасным по степени воздействия на организм является так называемый «black carbon», т.е. «черный углерод» - фракция сажи с аэродинамическим диаметром менее 2.5 мкм [5]. Черный углерод (ЧУ) – это продукт неполного сгорания всех видов органического топлива. Считается, что в мире 42% ЧУ поступает в результате сжигания биомассы (от лесных и торфяных пожаров), 24 % – с выбросами от дизельных двигателей внутреннего сгорания, 18 % в результате сжигания биотоплива для отопления (угольное и дровяное отопление), 16 % – от промышленных предприятий. А в США, например, вклад дизельного транспорта в суммарный выброс черного углерода достигает 52 %. [53].

Негативное действие ЧУ связано с тем, что на его поверхности адсорбируются продукты неполного окисления углеводородов, наиболее опасными из которых являются формальдегид и ПАУ (бенз-а-пирен, например), которые известны своими канцерогенными и прямыми токсическими эффектами на клетки живых организмов [54]. Международное агентство по изучению рака классифицировало сажевые частицы, выделяющиеся с отработавшими газами дизельных двигателей, как канцерогены 1 группы опасности для человека, на счет которых относится 5 % случаев смерти от рака легкого [5].

Наибольшую опасность и угрозу здоровью населения представляют эпизоды кратковременного (в течение нескольких часов или суток) чрезвычайно высокого уровня загрязнения воздуха взвешенными частицами.

1.2 Чрезвычайное загрязнение городской среды мегаполисов мелкодисперсными взвешенными частицами и роль автотранспорта в этом процессе

В июле-августе 2010 в Москве в связи с чрезвычайно неблагоприятными метеорологическими условиями и лесными пожарами были зарегистрированы аномально высокие уровни загрязнения воздуха [55-58]. Официальная статистика [58] свидетельствовала о том, что смертность в столице России в 2010 году выросла на 4.5% по сравнению с предыдущим 2009 годом. В работе [55] на основании оценки хронического и острого риска для здоровья населения, в соответствии с официально утвержденным нормативно-методическим документом – Руководством по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду Р 2.1.10.1920-04, – было установлено, что главным поллютантом, ответственным за негативные острые последствия 2010 года, является мелкодисперсный аэрозоль с аэродинамическим диаметром менее 10 мкм – PM_{10} – его доля в суммарном остром риске составила, по результатам исследования, 58.7 %.

Благодаря быстрому экономическому развитию, агрессивной экспансии промышленности и высоким темпам урбанизации, в большинстве городов Китая в течение последних десятилетий все чаще стали возникать ситуации экстремально высокого загрязнения воздуха мелкодисперсными взвешенными частицами $PM_{2.5}$, с образованием смога и дымки, сопровождающиеся серьезным ограничением видимости. В наиболее населенных регионах и городах таких, как в дельте реки Янцзы, дельте реки Чжуцзян и регионе Пекин-Тяньцзинь-Хэбэй периодическое чрезвычайное загрязнение воздуха принимает масштабы национального бедствия [59-68]. Основными источниками поступления $PM_{2.5}$ в городской воздух являются предприятия топливно-энергетического комплекса, автотранспорт, предприятия строительства, предприятия сельского хозяйства [59]. Нормирование содержания взвешенных частиц $PM_{2.5}$ в воздухе было впервые регламентировано только в феврале 2012 года в «Национальном стандарте качества воздуха» GB-3095-2012.

Одновременно, в 190 наиболее загрязненных городах было установлено 950 станций мониторинга концентраций $PM_{2.5}$ в воздухе [59].

Столица Китая – Пекин – в зимний период в течение последнего десятилетия неоднократно подвергалась чрезвычайно опасному загрязнению воздуха, преимущественно в зимний период, вследствие негативного воздействия выбросов автотранспорта, сжигания каменного угля, пылевых бурь, интенсивного развития строительной отрасли. Второго декабря 2015 года в Пекине было объявлено чрезвычайное положение в связи с экстремально высоким уровнем загрязнения воздуха. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) загрязнение взвешенными частицами $PM_{2.5}$ было превышено в 38 раз [65-67]. В черте города было запрещено проводить строительные работы, был закрыт проезд для грузового транспорта, ограничено движение легковых автомобилей, остановлено несколько заводов. Детям и подросткам рекомендовали остаться дома и не посещать учебные заведения, взрослые передвигались по улицам в защитных масках и респираторах [65-67].

Загрязнение воздуха по уровню угрозы для здоровья населения признается в Китае более опасным, чем эпидемия атипичной пневмонии 2002 года [59-67], поскольку на основании многократных, статистически обоснованных исследований было доказано, что вследствие чрезвычайного загрязнения воздуха в этой стране ежегодно преждевременно умирают 1.3-1.4 млн. человек [59-67]. Некоторые ученые высказывают опасения, что Пекин становится непригодным для проживания людей [68].

Европейские столицы тоже периодически подвергаются чрезвычайно высокому загрязнению атмосферного воздуха [69-71]. В Париже два раза вводилось чрезвычайное положение в связи с экстремально высоким загрязнением воздуха – в декабре 2013 года, когда содержание $PM_{2.5}$ в 30 раз превысило нормативное значение, и в марте 2014, когда среднесуточная ПДК была превышена в 9.5 раз. Оба раза французская столица в дневное время суток оказывалась в сумерках (рисунок 1). Если в первый раз чрезвычайная ситуация сложилась в результате локальных факторов – причиной стала аккумуляция в

атмосфере при неблагоприятных метеорологических условиях (штилевой погоде) мелкодисперсных и ультрадисперсных (нанодисперсных) взвешенных частиц, поступивших в воздухе с отработавшими газами дизельных двигателей автомобилей и с дымовыми газами, то во второй раз к локальным прибавились загрязнения, принесенные извне. Муниципальные власти Парижа сделали выводы из сложившейся ситуации, и, поскольку было установлено, что основным источником загрязнения является дизельный автотранспорт, в 2015 году был представлен план по выводу дизельных автомобилей из города к 2020 году. Таким образом, борьба с загрязнением свелась к сокращению числа дизельного автотранспорта – одного из основных источников мелко- и тонкодисперсных частиц, которые еще в 1988 году были признаны ВОЗ сильными токсикантами. Однако, несмотря на предупреждения, во Франции всячески поддерживались продажи дизельных автомобилей, и в результате, эта страна стала лидером по числу дизельного автотранспорта – 74 % автопарка.



Рисунок 1 – Париж 17 декабря 2014 года. Уровень загрязнения воздуха $PM_{2.5}$ превышен в 9.5 раз [69]

Аномальное, близкое к чрезвычайному, пылевое загрязнение воздуха в Санкт-Петербурге возникло во второй половине марта 2015 года, когда в результате быстрого таяния снега на улицах города и благодаря продолжительной сухой погоде, образовался так называемый пылевой смог. По данным экологического портала Комитета по природопользованию, охране окружающей

среды и обеспечению экологической безопасности Правительства Санкт-Петербурга [72], в городе с 12 по 19 марта 2015 года неблагоприятные метеоусловия: штили, приземные и приподнятые инверсии, отсутствие осадков, - привели к накоплению загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. В результате практически во всех районах города концентрация диоксида азота превысила ПДК_{мр} в 1.1-1.3 раза, концентрация оксида азота превысила ПДК_{мр} в 1.1-2.2 раза, а концентрация РМ₁₀ относительно ПДК_{мр} была превышена в 1.3-1.4 раза. 19 марта, практически во всех районах города, концентрация РМ₁₀ превысила среднесуточную ПДК в 1.3-3.2 раза, концентрация РМ_{2.5} превысила среднесуточную ПДК в 1.1-1.5 раза. Очевидно, что в целом сложилась ситуация экстремального загрязнения воздушного бассейна, и об этом свидетельствуют диаграммы [72] качества атмосферного воздуха по данным Автоматической системы мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга (рисунок 2).

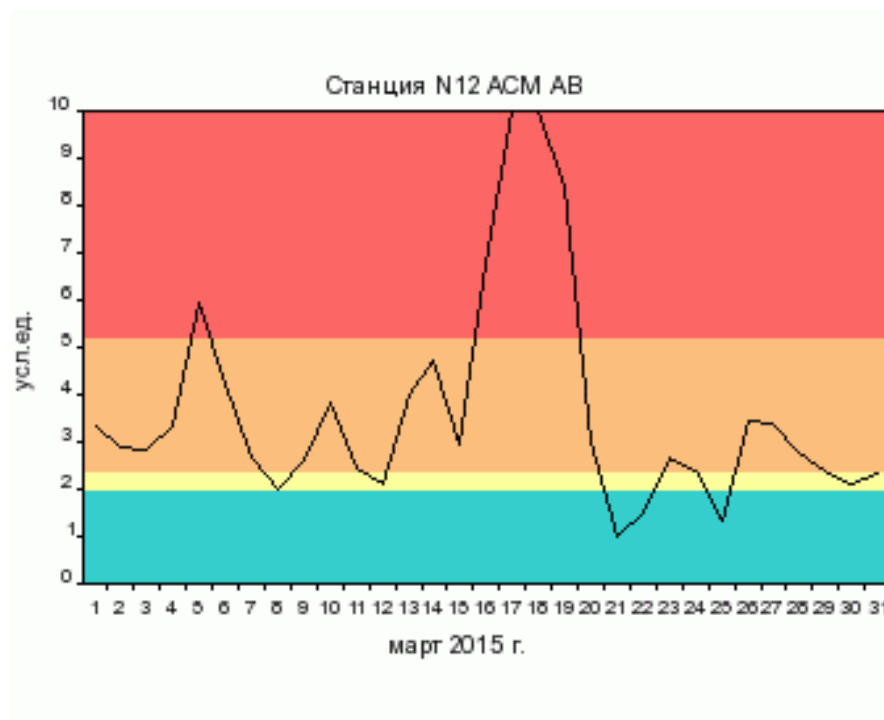


Рисунок 2 – Качество атмосферного воздуха по данным Автоматической системы мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга [72]

В Правительство Санкт-Петербурга поступали многочисленные обращения граждан с просьбой очистить и «отмыть» город от грязи, что было невозможно по

причине отрицательной температуры окружающей среды [73, 74]. Многие жители испытывали дискомфорт в виде першения в горле, раздражения слизистой оболочки глаз, особенно тяжело пришлось людям с аллергическими заболеваниями респираторной системы. В городе было зафиксировано также напряжение эпидемической ситуации, т.е. экстремальное пылевое загрязнение оказало негативное влияние на иммунную систему людей и, как следствие, повысилась восприимчивость к инфекционным заболеваниям.

В городских агломератах грубые аэрозольные частицы с аэродинамическим диаметром более 10 мкм формируются, главным образом, в результате естественных процессов эрозии и выветривания почвенных и грунтовых поверхностей, а также в результате деятельности человека – при проведении строительных и ремонтных работ, в процессе производства и транспортировки сыпучих строительных материалов (цементные, бетонные, керамзитные заводы и т.д.). В то же время PM_{10} и $PM_{2.5}$ поступают в атмосферу городов преимущественно от техногенных (антропогенных) источников [75]: предприятий топливно-энергетической отрасли, автотранспортного комплекса, включая непосредственно автотранспортные средства и автомобильные дороги, объектов стройиндустрии, предприятий металлургической промышленности и пр. В соответствии с данными ВОЗ, вклад основных источников в суммарный антропогенный выброс первичных PM_{10} в городах распределяется следующим образом: автотранспорт – 10-25 %, сжигание топлива на стационарных установках – 40-55 %, технологические процессы в промышленности – 15-30 %, дальний перенос от источников, находящихся за пределами города, – 26-34 %. При этом основным источником поступления $PM_{2.5}$ является автомобильный транспорт [75].

Научные работы по изучению пылевого загрязнения воздушной среды и способов его снижения проводятся как в Российской Федерации [8-11, 13, 76-80], так и за рубежом [91-100]. В Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова ведутся фундаментальные исследования влияния антропогенного аэрозольного загрязнения воздуха на процессы, происходящие в нижних и

верхних слоях атмосферы и на изменение климата [8-11, 13, 76-80]. В Волгоградском архитектурно-строительном университете под руководством профессора В.Н. Азарова изучаются прикладные аспекты загрязнения урбанизированной среды ВЧ: изучаются вопросы определения качественного и количественного состава пылевидных загрязнителей; разрабатываются технологические подходы для снижения пылевого загрязнения воздуха при проведении строительных работ, земляных работ, восстановлении разрушенных зданий и сооружений городского хозяйства, эксплуатации заводов по производству силикатного кирпича и асбестоцемента и автотранспорта [81-90].

Промышленные предприятия, теплоэлектростанции и строительные объекты являются локализованными в пространстве источниками выбросов ВЧ и других поллютантов, поэтому для снижения поступлений пылевидных загрязнителей от них применяются системы аспирации и пневмопылеуборки.

Особенностями автотранспортных потоков как источника поступления в атмосферный воздух опасных ВЧ и других загрязнителей, являются неорганизованность, повсеместность и выброс вредных веществ на уровне дыхания человека.

В Европейском Союзе в 2012-2015 годах проводился масштабный международный проект TRANSPHORM (Transport related air pollution and health impacts – Загрязнение воздуха транспортом и ущерб здоровью), который объединил ведущих специалистов и исследователей из 21 университета и научных учреждений из 14 стран Европейского Союза [101]. Главным результатом проекта явилась разработка и внедрение комплексной методологии для оценки воздействия на здоровье взвешенных частиц вследствие загрязнения воздуха транспортом, охватывающей всю цепочку от выбросов ВЧ транспортными средствами до определения ущерба здоровью [91-101].

1.3 Характеристика автотранспорта как источника поступления PM_{10} и $PM_{2.5}$ в атмосферный воздух городов

1.3.1 Различные аспекты проявления негативного воздействия автомобильного транспорта на человека и окружающую среду

Негативное воздействие автотранспортного комплекса на окружающую природную и техносферную среду и жизнедеятельность человека на урбанизированных территориях проявляется в нескольких аспектах [102-138]:

- загрязнение атмосферного воздуха токсичными поллютантами, выделяющимися с ОГ автомобилей [102-125, 136];
- высокая гибель и травматизм в результате дорожно-транспортных происшествий (ДТП) [126-129];
- шумовое и вибрационное загрязнение [131-133];
- загрязнение грунтовых вод и почвенных покровов предприятиями автомоек и автосервисов [130, 135];
- использование значительных участков городских территорий для объектов автотранспортной инфраструктуры (автодороги, парковки, бензоколонки, автомагазины, предприятия автомоек и автосервиса) [103, 112, 115, 137, 138];
- образование отходов в результате производства и эксплуатации автотехники, а также строительства и ремонта автомобильных магистралей [134];
- высокое потребление углеводородных ресурсов [120, 122].

Среди широкого спектра отрицательных воздействий автотранспорта на окружающую среду и человека, приоритетным остается загрязнение воздушного бассейна. А в Российской Федерации, в условиях продолжающегося спада промышленного производства и неуклонного роста численности автотранспортных средств [102-125, 136-138], автомобильный транспорт стал в течение последнего десятилетия главным источником загрязнения воздуха в

городах, валовая доля которого в суммарных выбросах достигает 70-90 % [102-125, 136-140].

1.3.2 Состояние нормирования и контроля выбросов вредных веществ в атмосферу от автотранспортных средств в Российской Федерации и за рубежом

Для решения проблемы чрезвычайного загрязнения воздушного бассейна выбросами автотранспорта в мировой и российской практике в течение последних 25 лет имело место постоянное ужесточение нормативных требований в отношении содержания основных загрязняющих веществ в отработавших газах автомобилей и в отношении качества используемого топлива [141-143].

В Соединенных Штатах Америки (США) в настоящее время действует нормативный стандарт *Tier 2*, но уже разработана интегрированная комплексная программа стандартов *Tier 3* [142], предназначенная для минимизации воздействия автотранспорта на качество воздуха и здоровье населения. *Tier 3* войдет в силу с 2017 года. Новый стандарт предусматривает для легковых автомобилей и легкого коммерческого транспорта (ЛКТ) снижение выбросов неметановых летучих органических соединений (НМЛОС) и NO_x на 80%, а ВЧ ($\text{PM}_{2.5}$) – на 70%, для грузовых автомобилей – уменьшение выбросов НМЛОС, NO_x и $\text{PM}_{2.5}$ – на 60%, по сравнению с действующими на данный момент нормативами. Также *Tier 3* предусматривает снижение выбросов летучих органических соединений (ЛОС) как за счет сокращения выбросов с ОГ, так и за счет сокращения выбросов ЛОС в результате испарения, и устанавливает новые требования по содержанию серы в автомобильном топливе.

В Европейском Союзе в настоящее время действуют стандарты Евро 5 как в отношении содержания вредных веществ в ОГ автомобилей, так и в отношении автомобильного топлива, которые вошли в силу с 2009 года [143]. Требования нормативов Евро 0 - Евро 6 представлены в приложении А. Основной задачей норматива Евро 5 явилось снижение выбросов сажевых частиц ($\text{PM}_{2.5}$)

автотранспортными средствами с дизельными двигателями с 25 до 5 мг/км, а главной целью стандарта Евро 6, введение которого уже несколько раз откладывалось из-за технологических трудностей, является сокращение выбросов NO_x дизельными АТС со 180 до 80 мг/км.

В России, несмотря практически на десятилетнее отставание в вопросах стандартизации содержания ЗВ в выбросах АТС и качества автомобильного топлива [144-147], с 01.01.14 все новые автомобили, производимые на территории РФ и импортируемые в нашу страну, должны были соответствовать экологическому классу 4, гармонизированному с европейским стандартом Евро 4, а с 01.01.16 – экологическому классу 5, гармонизированному с европейским стандартом Евро 5 [144, 145]. Что касается регламентирования качества топлива, выпуск в оборот автомобильного бензина и дизельного топлива высоких экологических стандартов класса 4 и 5 был серьезно отсрочен по техническим причинам: класс 4 вступил в действие с 01.01.15 и действовал до 31.12.15, а класс 5 – с 01.01.16 [146, 147].

Однако, даже с учетом складывающихся позитивных тенденций в области законодательного регулирования воздействия автотранспортного комплекса на окружающую среду и человека в нашей стране, в сфере дорожно-транспортной экологической безопасности по-прежнему остается достаточно много нерешенных проблем, во многом обусловленных высокими темпами роста численности АТС [120-122, 125, 149]. Эти обстоятельства, в свою очередь, диктуют необходимость развития и совершенствования транспортной инфраструктуры на урбанизированных территориях, а также создания и совершенствования методологических подходов для оценки влияния действующих автомагистралей и прогнозирования влияния проектируемых автодорог на качество атмосферного воздуха в городах. Одна из таких нерешенных проблем связана с отсутствием научно обоснованных экспериментально-расчетных методик прогнозирования воздействия пылевидных продуктов транспортного процесса на население в окрестностях автомагистралей.

1.3.3 Современные российские методики оценки и прогнозирования выбросов вредных веществ от автотранспортных средств. Их недостатки в части определения пылевидных продуктов, образующихся при транспортном процессе

В настоящее время в РФ действуют двенадцать методик для расчета выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта, и только три из них можно отнести к современным [150-153], скорректированным с учетом изменившейся структуры автопарка в нашей стране, а именно: Методику определения выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух от автотранспортных потоков, движущихся по автомагистралям Санкт-Петербурга (Санкт-Петербург, 2012) [150], Методику определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов (Санкт-Петербург, 2010) [151] и Расчетную инструкцию (методику) по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ от автотранспортных средств на территории крупнейших городов (Москва, 2012) [153]. Первые две методики были разработаны в “НИИ Атмосфера” (г. Санкт-Петербург), а третья – в Научно-исследовательском институте автомобильного транспорта (НИИАТ, г. Москва). С перечнем всех методик, действующих с 1993 года, можно ознакомиться в публикации [154].

Методики [150 и 151] предназначены для расчетной оценки и прогнозирования выбросов NO_x , соединений свинца, ЛОС, ВЧ (PM), CO, формальдегида, SO_2 , бенз- α -пирена от автотранспортных потоков по результатам натурного обследования структуры и интенсивности движения на улицах города. Методики [152 и 153] позволяют определять валовые выбросы CO, ЛОС, NO_x ВЧ (PM), SO_2 , соединения свинца, CO_2 , CH_4 , НМЛОС, NH_3 , и N_2O на основании статистической информации о структуре автопарка (например, по данным учета ГИБДД).

Существенными недостатками выше перечисленных расчетных методик для оценки выбросов от АТС на локальном (магистральном) уровне [150, 151] и на региональном уровне [152, 153] является то, что они учитывают только сажевые частицы, выделяющиеся с ОГ двигателей, и не учитывают другие пылевидные

продукты, образующиеся в ходе транспортного процесса, а также отсутствие в них дифференциации ВЧ: PM_{10} и $PM_{2.5}$, отличающихся по своим токсикологическим характеристикам и нормированными значениями предельно допустимых концентраций (см. п. 1.1.2). Как следствие, расчетные значения получаются ниже реально измеряемых. Так в работе [125], посвященной оценке загрязнения воздуха автотранспортом в Санкт-Петербурге с использованием российских и европейских расчетных моделей, на примере КАД Санкт-Петербурга было установлено, что расчетные значения концентраций ВЧ получаются на 15-25 % ниже экспериментальных данных. Авторы связали полученный результат как раз с тем фактом, что модельный подход [150], позволяет определить только вклад сажевых частиц, выделяющихся с ОГ, а частицы, поступающие из других источников (в результате истирания шин, тормозных колодок, дорожного полотна) в нем не учитываются.

1.4 Выводы по обзору

1. В отличие от хорошо изученных газообразных загрязнителей атмосферного воздуха (например, CO , NO_x , SO_2 , O_3), взвешенные частицы (мелкодисперсные аэрозоли) характеризуются такими особенными свойствами, определяющими протекание физико-химических процессов в атмосфере, а также их токсичность, как высокой удельной поверхностью дисперсной фазы, значительным временем витания в воздушной среде (от нескольких часов до нескольких суток), отсутствием определенного химического состава. ВЧ могут включать химически инертные компоненты, например, углерод C , оксид кремния SiO_2 , и адсорбированные на них высоко реакционноспособные и канцерогенные вещества: окислители, сульфат- и нитрат-ионы, тяжелые металлы, органические соединения, в том числе чрезвычайно токсичные полициклические ароматические углеводороды. Разнообразие химического состава и размеров ВЧ является причиной затруднений, возникающих при оценке их токсичности.

2. Риск опасного воздействия ВЧ связан, прежде всего, с мелкодисперсными аэрозольными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$, способными адсорбировать на своей поверхности токсичные и канцерогенные вещества, и, благодаря микроразмерам, проникать в кровеносное русло человека, вызывая бронхо-легочные, сердечно-сосудистые и онкологические заболевания.

3. Нормативные значения, определяющие безопасный уровень воздействия PM_{10} и $PM_{2.5}$, отличаются в РФ, ЕС и США:

- в ЕС и США отсутствуют максимально разовые ПДК;
- ВОЗ, ЕС и США используют более жесткие нормативы в отношении среднесуточной и среднегодовой ПДК для PM_{10} и $PM_{2.5}$, чем в РФ;
- в России среднесуточная ПДК для $PM_{2.5}$ в 1,4 раза выше значения, установленного ВОЗ и в ЕС, а среднегодовая ПДК для $PM_{2.5}$ в 2.5 раза выше норматива, рекомендованного ВОЗ, и в 2 раза выше предельных значений, установленных в ЕС и США;
- Среднесуточная и среднегодовая ПДК для PM_{10} , соответственно, в 1.2 и в 1.75 раз больше предельных нормативов, утвержденных ВОЗ и ЕС.

4. Наиболее опасные PM_{10} и $PM_{2.5}$, поступающие в атмосферу городов преимущественно от техногенных (антропогенных) источников: предприятий топливно-энергетической отрасли и автотранспортного комплекса, – многократно являлись причиной экстремально высокого загрязнения воздуха в крупнейших городах мира (Москве, Санкт-Петербурге, Лондоне, Лос-Анджелесе, Дели и пр.), приводя в некоторых случаях к введению чрезвычайного положения (в Париже в декабре 2013 г. и марте 2014 г. и Пекине в декабре 2013 г. и декабре 2015 г.). При этом вклад автотранспортного комплекса в возникновении чрезвычайных ситуаций подобного рода составляет от 20-25 % (Пекин, Дели) до 50-70 % (Лос-Анджелес, Париж).

5. Методологическое обеспечение в сфере мониторинга ЧС такого типа в Российской Федерации сдерживается, по сути, отсутствием научно обоснованных экспериментально-расчетных методик прогнозирования воздействия пылевидных продуктов транспортного процесса, включая оценку выбросов сажевых частиц с

отработавшими газами, а также частиц, поступающих в результате износа шин, тормозных колодок, дорожного полотна, наносных частиц и вторичной взвеси, на население в окрестностях автомагистралей, что не позволяет оценивать реальные негативные последствия для здоровья населения и разрабатывать адекватные им мероприятия по ослаблению техногенных рисков. Также следует отметить недостаточную изученность физического механизма пылепереноса в окрестностях автодорог.

2 Экспериментально-расчетные исследования уровня загрязнения воздуха взвешенными частицами на автомагистралях Санкт-Петербурга

2.1 Методы и средства измерения пылевидных продуктов

В настоящее время для определения концентрационного и дисперсионного состава ВЧ в воздухе широко используются два методических подхода: гравиметрический и оптический (нефелометрический или турбидиметрический). Сущность гравиметрического метода заключается в определении массы взвешенных частиц пыли разного размера, задержанных на специальных аналитических фильтрах, изготовленных из стекловолокна или кварцевого волокна. По величине привеса на фильтре, устанавливаемом путем его взвешивания до и после прохождения через него определенного объема воздуха, находится массовая концентрация аэрозоля. Гравиметрический метод является абсолютным (эталонным) методом анализа, не требующим определения градуировочной функции. Его основные преимущества заключаются в возможности прямого определения массовой концентрации пыли и отсутствии влияния ее физико-химических свойств на результат измерения. Существенным недостатком и ограничением применимости гравиметрии в полевых условиях является трудоемкость (аналитические фильтры с осажденными на них частицами требуется доставлять в аналитическую лабораторию для взвешивания) и дискретность, т.е. невозможность определения мгновенных концентраций в режиме непрерывных измерений.

Нефелометрический метод определения концентрации основан на измерении интенсивности света, рассеянного взвешенными частицами, иными словами, на оценке прозрачности воздушного потока определенного объема, проходящего через детектор. Турбидиметрический метод очень похож на метод нефелометрии, однако в отличие от него, аналитическим сигналом служит интенсивность не рассеянного света, а прошедшего.

Нефелометрия и турбидиметрия являются относительными методами анализа, поэтому для их использования необходима градуировка.

Для решения поставленных экспериментальных задач, требующих непрерывного измерения концентраций ВЧ непосредственно на автомобильной дороге, наиболее подходят оптические методы, поскольку они позволяют оценивать содержание ВЧ в режиме “on-line”.

В качестве такого метода был выбран оптический метод косвенного измерения концентрации частиц методом лазерной нефелометрии с детектированием интенсивности рассеянного света с помощью двух одинаковых приборов *DUSTTRAK 8530* (TSI Incorporated/ USA). Общий вид прибора показан на рисунке 3, его метрологические характеристики представлены в таблице 2, а принцип измерений – на рисунке 4.



Рисунок 3 – Прибор *DUSTTRAK 8530*, с пробоотборником и 4-мя сменными фильтрами для отсеивания частиц PM_{10} , PM_4 , $PM_{2.5}$ и PM_1

Луч полупроводникового лазера с длиной волны 680 нм освещает определённый измерительный объём (рисунок 4). Свет, рассеянный мелкодисперсным аэрозолем, попадает на фотодетектор, установленный под

углом 90° . Усилитель преобразует сигнал от фотоэлемента в потенциометрический выходной сигнал, прямо пропорциональный массовой концентрации аэрозоля.

Таблица 3 – Метрологические характеристики прибора *DUSTTRAK 8530*.

Тип датчика	лазерный диод, 90° рассеивание света
Диапазон измерений	0,001-100 мг/м ³
Разрешение:	$\pm 0,1 \%$ от измеряемой величины, или $\pm 0,001$ мг/м ³ , что больше
Диапазон размера частиц	0,1 - 10 мкм (верхний предел зависит от расхода пробы)
Диапазон расхода пробы	1,4 - 3,0 л/мин. (3,0 л/мин - заводская установка)
Погрешность задания расхода	$\pm 5 \%$
Температурный коэффициент:	+0,001 мг/м ³ на 1°C
Пределы допускаемой основной приведенной погрешности	20%
Регистрация данных	45 дней при усреднении проб в интервале 1 мин.
Интервал регистрации данных	регулируемый, от 1с до 1 часа
Время непрерывной работы	18 часов (от двух батарей)

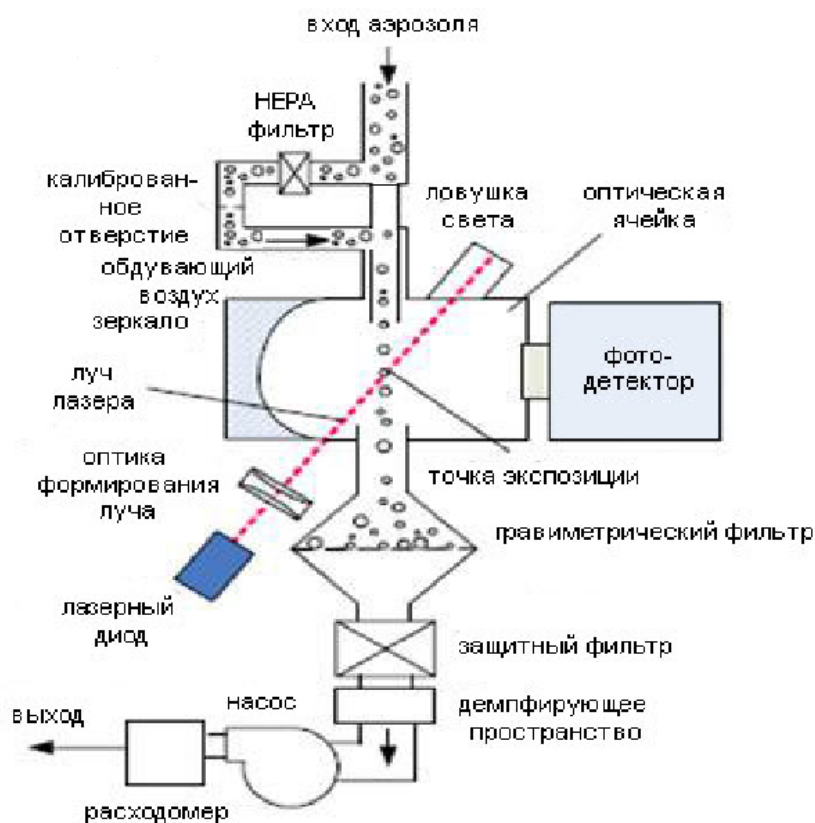


Рисунок 4 – Функциональная схема измерения прибора *DUSTTRAK 8530*

В работе были также использованы результаты дорожных измерений концентраций ВЧ на высоко загруженных магистралях города (проспекте Славы, Пискаревском проспекте и Лиговском проспекте), полученные мобильной лабораторией Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности правительства Санкт-Петербурга (далее - Комитета), оборудованной немецким прибором АРМ-2 (*Comde Derenda / Germany*) для непрерывного измерения PM_{10} и $PM_{2.5}$ в атмосферном воздухе (рисунок 5).



Рисунок 5 – Прибор АРМ-2 для автоматического пробоотбора и непрерывного измерения PM_{10} и $PM_{2.5}$ в атмосферном воздухе

Для *on-line* контроля концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ в мобильной лаборатории используется нефелометрический метод с 20-минутным периодом осреднения,

принцип действия которого аналогичен прибору *DUSTTRAK 8530*. Диапазон измерений прибора составляет от 1 до 1000 мкг/м³, разрешение 1 мкг/м³ [155].

2.2 Объекты исследования, условия дорожных экспериментов

В качестве объектов исследования были выбраны высоко загруженные автодороги Санкт-Петербурга разных категорий: магистральные дороги с регулируемым движением, разрешенные для проезда грузового автотранспорта, – Митрофаньевское шоссе, Колтушское шоссе, проспект Славы, Пискаревский проспект; магистральные улицы общегородского значения с регулируемым движением, свободные от проезда грузовых автомобилей, – Московский проспект, Лиговский проспект; магистральная дорога скоростного движения – Кольцевая автомобильная дорога Санкт-Петербурга (КАД Санкт-Петербурга). Характеристики исследованных автомагистралей представлены в таблице 3.

Таблица 4 – Основные характеристики исследованных автодорог.

Автомагистраль	Протяженность, км	Ширина, м	Число полос	Прилегающие окрестности	Примечания
Московский пр.	9.57	21-42	4-8	Плотная застройка; этажность зданий – в основном, 4-6 этажей	Проспект пересекает Фонтанку, Загородный проспект, Обводный канал, Лиговский и Ленинский проспекты.
Лиговский пр.	5.94	10-38	2-8	Плотная застройка; этажность зданий – в основном, 4-6 этажей	Одна из основных магистралей Санкт-Петербурга. Пролегает от улицы Некрасова до площади Московские Ворота.
Пр. Славы	3.68	20-48	8	Плотная застройка; этажность зданий – 5-20 этажей	Одна из важнейших транзитных магистралей Фрунзенского района Санкт-Петербурга, предназначенная для движения транспортного потока «запад-восток» и соединяющая Московский и Невский районы (улицы Типанова и Ивановскую), является частью Центральной Дуговой магистрали.
Пискаревский пр.	7.65	50-20	4-8	Плотная застройка; этажность зданий – 1-22 этажа	Одна из крупнейших транзитных магистралей Санкт-Петербурга, проходит от Свердловской набережной на север, почти до границы города, служит границей между Калининским (чётная сторона) и Красногвардейским (нечётная сторона) районами.
Колтушское ш.	9.92	25-8	6-2	Застройка не плотная; преобладают индивидуальные жилые дома, производственные и складские комплексы; этажность зданий – 1-8этажей	Колтушское шоссе находится во Всеволожском районе Ленинградской области, является продолжением петербургского проспекта Косыгина.

Автомагистраль	Протяженность, км	Ширина, м	Число полос	Прилегающие окрестности	Примечания
Митрофаньевское ш.	2.35	12-20	4-6	Жилая застройка не плотная; преобладают административно-бытовые и складские комплексы, гаражные кооперативы; этажность зданий – 1-8этажей	Шоссе в Адмиралтейском и Московском районах Санкт-Петербурга. Меридиональная радиальная магистраль в историческом районе Горячее поле. Проходит от набережной Обводного канала до линии Соединительной железной дороги.
КАД СПб	142.15	30-64	4-8		Автомобильная дорога общего пользования федерального значения, располагающаяся на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Большая часть дороги проходит в окрестностях административной границы города и области и является автомагистралью скоростного движения.
От Приморского ш. до Токсовского ш.	31.4	30-64	4-8	Жилая застройка не плотная	На этом участке автомобильная дорога проходит, в основном, по границе области и города на значительном удалении от жилых кварталов (более 1 км).
От Токсовского ш. до Таллинского ш.	48.2	64	8	Жилая застройка плотная этажность зданий (2-10эт)	На участке от Мурманского ш. до Таллинского дорога проходит в черте города вблизи жилых домов на удалении от 37 м (над Запоржской улицей) до 120 м (в микрорайоне Дачное).
От Таллинского ш. до Краснофлотского ш.	30.6	30-64	4-8	Жилая застройка не плотная	На этом участке автомобильная дорога проходит в Ленинградской области на значительном удалении от жилых домов (более 1 км).

Исследования проводились в часы пиковой загрузки. Собственные полевые эксперименты проводились на Митрофаньевском шоссе, Колтушском шоссе, Московском проспекте и КАД Санкт-Петербурга (рис. 6). Измерения содержания ВЧ в придорожном воздухе осуществлялись одновременно с натурными обследованиями дорожной ситуации на этих автодорогах с оценкой интенсивности движения, состава и скоростного режима движения транспортных потоков, параметров прилегающей застройки. Полевые эксперименты повторялись многократно в утренние часы с 8.00 до 10.00, дневные часы с 12.00 до 16.00 и вечерние часы с 17.00 до 21.00 в марте, апреле, июне, июле, октябре и ноябре 2015 года, а также январе, феврале и марте 2016 года при разных погодных условиях.

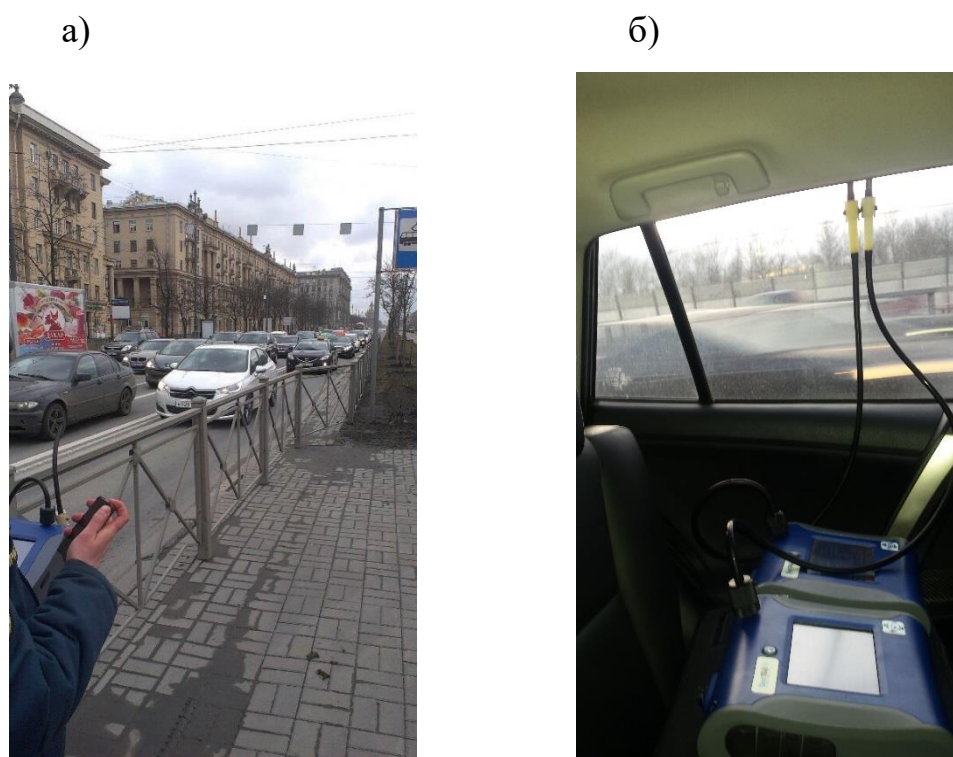


Рисунок 6 – Процесс измерений концентраций на Московском проспекте (а) и КАД Санкт-Петербурга (б)

Для определения метеорологических параметров при проведении дорожных экспериментов использовали цифровой анемометр Аэротема ВМ8908 для измерения скорости ветра (диапазон измерения скорости ветра (воздушного

потока) – 0~30 м/с; точность измерения воздушного потока – $\pm 5\%$) и термогигрометр Oregon THGR810 (диапазон измерений температуры от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$, разрешение 0.1°C ; диапазон измерений относительной влажности от 25 % до 95 %, разрешение 1 %).

Измерения концентрационного и дисперсного состава ВЧ мобильной лабораторией Комитета на проспекте Славы, Пискаревском и Лиговском проспектах проводились в 2012-2013 годах один раз в месяц в часы максимальной транспортной загрузки. Автотранспортные потоки на этих магистралях обследовались дополнительно. Сведения о метеорологических параметрах были установлены либо на основании данных измерений Комитета, либо по данным архивов гидрометеорологических параметров.

Дорожная ситуация на автодорогах изучалась в соответствии с процедурой, описанной в методике [151], путем видеосъемки. В течение 20 минут снимали на видеокамеру участок улично-дорожной сети с движущимся по нему автотранспортом, а затем подсчитывали число АТС по пяти легко идентифицируемым категориям: легковые автомобили, легкий коммерческий транспорт (ЛКТ), грузовые автомобили массой от 3.5 до 12 т, грузовые автомобили массой более 12 т, автобусы. Видеосъемка позволяет минимизировать ошибку при подсчете. Одновременно, в протоколах фиксировали такие параметры, как скорость движения АТП, число полос и геометрические параметры автодороги. Образец протокола приведен в приложении 2.

2.3 Результаты натурных обследований автотранспортных потоков

В ходе проведенных мною дорожных экспериментов были исследованы наиболее загруженные участки автодорог: на Московском проспекте – это участок от Загородного проспекта до Кузнечной улицы, на Лиговском проспекте – участок от площади Восстания до Растанной улицы, на проспекте Славы – участок от Будапештской до Софийской улицы, на Пискаревском проспекте – участок от Свердловской набережной до КАД, на Митрофаньевском шоссе –

участок от Обводного канала до Благодатной улицы, на Колтушском шоссе – участок от КАД до Мятловского шоссе, на КАД Санкт-Петербурга – участок от Пискаревского проспекта до Московского шоссе. Результаты натурных обследований представлены в таблице 4.

Следует отметить, что при проведении обследований автомагистралей скорость движения категорий АТС определялась визуально наблюдателем, ведущим подсчет автомобилей на своем посту, а также при передвижении на собственном автомобиле в потоке. Средняя скорость общего потока оценивалась с использованием интернет-сервиса «яндекс-пробки», который в *on-line* режиме предоставляет сведения о плотности движения на городских улицах.

Результаты натурных обследований характеристик автотранспортных потоков на автодорогах с регулируемым движением в черте города (Московском проспекте, Лиговском проспекте, Пискаревском проспекте, проспекте Славы и Митрофаньевском шоссе) хорошо согласуются с данными, полученными другими авторами в 2006 [156], 2008 [157] и 2014 [158] годах. Было подтверждено, что, в среднем, максимальная транспортная нагрузка на этих магистралях в часы пик варьируется от 2500 до 4000 авт/ч при средней скорости движения плотного автотранспортного потока от 30 до 45 км/ч. В период проведения полевых обследований максимальная интенсивность движения, равная 4005 авт/ч, была зарегистрирована на Пискаревском проспекте.

Изучение структуры автотранспортных потоков показало, что доля легковых автомобилей на автодорогах в черте города составила 83.9 % на Московском проспекте, 76.2 % на Лиговском проспекте, 80.1 % на проспекте Славы, 83.4 % на Пискаревском проспекте и 79.9 % на Митрофаньевском шоссе. Доля легкого коммерческого транспорта в потоке составила 13.3 % на Московском проспекте, 19.8 % на Лиговском проспекте, 8.2 % на проспекте Славы, 9.3 % на Пискаревском проспекте и 6.8 % на Митрофаньевском шоссе.

Таблица 5. Характеристики автотранспортных потоков на наиболее загруженных участках ряда ведущих автомагистралей Санкт-Петербурга.

№	Магистраль	Число полос	Интенсивность движения, авт/ч						Скорость движения, км/ч			
			Л	ЛКТ	$\Gamma_{3.5-12т}$	$\Gamma_{>12т}$	А	Всего	Л	ЛКТ	Г	А
1	Московский пр. (от Загородного пр. до Кузнечной ул.)	4-8	2961	471	-	-	96	3528	55	55	-	45
2	Лиговский пр. (ул. Некрасова до площади Московские Ворота)	2-8	2352	612	-	-	123	3087	50	50	-	45
3	Пр. Славы (от Будапештской до Софийской ул.)	4-8	2262	231	192	18	120	2823	55	50	42	40
4	Пискаревский пр. (от Свердловской набережной до КАД)	4-8	3336	372	234	36	24	4002	55	55	40	40
5	Колтушское ш. (от КАД до Мятловского ш.)	2-6	1965	402	162	15	30	2574	55	55	44	40
6	Митрофаньевское ш. (от наб. Обводного Канала до Благодатной ул.)	4-6	2439	207	282	30	96	3054	52	60	55	45
7	Южный участок КАД (от Московского ш. до Мурманского ш.)	4-8	7726	1149	278	1623	48	10824	110	110	92	84
8	Восточный участок КАД (от Мурманского шоссе до ул. Культуры)	4-8	9794	1229	318	1687	53	13081	110	110	93	87

Примечания: Л – легковые автомобили, ЛКТ – легкий коммерческий транспорт (микроавтобусы и автофургоны <3.5 т), Г – грузовые автомобили, $\Gamma_{3.5-12т}$ – грузовые автомобили массой от 3.5 до 12 т, $\Gamma_{>12т}$ – грузовые автомобили массой >12 т, А – автобусы.

Доля автобусов – 2.8 % на Московском проспекте, 4.0 % на Лиговском проспекте, 4.3 % на проспекте Славы, 0.6 % на Пискаревском проспекте и 3.1 % на Митрофаньевском шоссе.

Доля грузовых автомобилей составила, соответственно, 7.4 % на проспекте Славы (91.4 % грузовых автомобилей массой от 3.5 до 12 т и 8.8 % – более 12 т), 6.7 % на Пискаревском проспекте (86.7 % грузовых автомобилей массой от 3.5 до 12 т и 13.3 % - более 12 т) и 10 % на Митрофаньевском шоссе (90.4 % грузовых автомобилей массой от 3.5 до 12 т и 9.6 % - более 12 т). Примерно такая же структура потока наблюдалась и на пригородном Колтушском шоссе: 76.3 % – легковых автомобилей, 15.6 % – ЛКТ, 1.2 % - автобусов и 6.9 % - грузовых, из которых 91.5 % составили грузовые автомобили категории от 3.5 до 12 т и 8.5 % - грузовики массой более 12 т.

На единственной скоростной автомобильной дороге Санкт-Петербурга, введенной в полную эксплуатацию, интенсивность движения и структура транспортных потоков существенно отличаются. Интенсивность движения АТП на северо-восточном и юго-восточном участках КАД в 3.5 – 4 раза выше, чем на городских дорогах с регулируемым движением, и достигает 11000-13000 авт/ч. В структуре потока также преобладают легковые автомобили (71.3 % – на юго-восточном участке и 74.9 % – на северо-восточном участке), однако, доля грузового транспорта значительно выше – 17.6 % на юго-восточном участке КАД и 15.3 % – на северо-восточном участке. При этом следует отметить, что в структуре грузового транспорта преобладают тяжелые автомобили массой более 12 т, доля которых составляет 85.3 % на юго-восточном участке и 81.4 % на северо-восточном участке, соответственно.

Возрастание общей численности автомобилей на КАД СПб и на городских автомагистралях, а также увеличение численности и доли дизельного грузового транспорта, который, в основном, представлен в нашей стране устаревшими ТС экологических классов ниже Евро 2, может приводить к возникновению чрезвычайных ситуаций, связанных с экстремально высоким загрязнением

воздуха выбросами АТС, в особенности NO_x и РМ, при сочетании неблагоприятных метеорологических, дорожных и градостроительных факторов, представляющих опасность как для участников движения, так и для жителей окрестных домов.

2.4 Результаты исследования концентрационного состава мелкодисперсных аэрозолей вблизи автомобильных дорог

Рассеивание загрязняющих примесей в атмосферном воздухе зависит от многих факторов, но, безусловно, метеорологические параметры являются определяющими. Общегосударственный нормативный документ ОНД-86 [158] – общесоюзное руководство по расчету максимально разовых концентраций ЗВ в атмосфере, – устанавливает такие понятия, как НМУ – неблагоприятные (для рассеивания атмосферных примесей) метеорологические условия, ННМУ – нормальные (регулярно наблюдающиеся) неблагоприятные метеорологические условия и АНМУ – аномально неблагоприятные метеорологические условия [159]. По аналогии, для описания влияния погодных условий на концентрации ВЧ в воздухе, мною были введены дополнительные условные понятия: БМУ – благоприятные (для рассеивания атмосферных примесей) метеорологические условия и НБМУ – нормальные (т.е. наиболее характерные для исследуемой местности) благоприятные метеорологические условия.

Для пылящих источников некоторые термины и определения, используемые в ОНД-86 и других общегосударственных и отраслевых документах, требуют особых разъяснений. Для большинства типов источников загрязнения атмосферного воздуха неблагоприятными являются «застойные ситуации», когда в атмосферном пограничном слое сочетаются мощные температурные инверсии со слабыми ветрами ($<1-2$ м/с) у подстилающей поверхности [158, 159]. Для пылевидных частиц такие метеоусловия стоит отнести к благоприятным, поскольку при них не возникают пыльные поземки. Специфика ВЧ с точки зрения их рассеивания заключается в том, что существенное загрязнение приземной

атмосферы пылевидными продуктами имеет место при пыльных поземках, т.е. при умеренных и сильных ветрах.

В связи с вышесказанным, мною были выделены три условные категории метеорологических параметров, при которых проводились полевые измерения концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ на автодорогах Санкт-Петербурга:

1) БМУ – благоприятные (для оседания ВЧ) метеорологические условия, к которым относятся слабый/умеренный ветер, обильные осадки, высокая влажность;

2) НБМУ – нормальные (достаточно часто и регулярно наблюдающиеся в Санкт-Петербурге) благоприятные (для оседания ВЧ) метеорологические условия, – слабый/умеренный ветер, переменная облачность/осадки, умеренная/высокая влажность;

3) НМУ – неблагоприятные (для оседания ВЧ) метеорологические условия, к которым относятся сильный/умеренный ветер, длительная сухая погода, невысокая/умеренная влажность.

Результаты измерений на Московском проспекте показали, что концентрации взвешенных частиц при БМУ составили, в среднем, по $PM_{2.5}$ – 4.4 ± 0.6 мкг/м³, а по PM_{10} – 8.0 ± 3.6 мкг/м³, при НБМУ – по $PM_{2.5}$ – 17.3 ± 6.3 мкг/м³, а по PM_{10} – 34.5 ± 17.4 мкг/м³, при НМУ – по $PM_{2.5}$ – 19.2 ± 10.2 мкг/м³, а по PM_{10} – 57.6 ± 37.2 мкг/м³. Московский проспект – единственная автомагистраль, на которой в ходе проведенного исследования не были зафиксированы эпизоды превышения ПДК_{СС} PM_{10} и $PM_{2.5}$. Примеры диаграмм измерений концентраций представлены на рис. 7.

Аналогичная тенденция наблюдалась и на Лиговском проспекте, также свободном от проезда грузового транспорта, при БМУ и НБМУ: концентрации взвешенных частиц при БМУ составили по $PM_{2.5}$ – 3.8 ± 1.4 мкг/м³, а по PM_{10} – 7.8 ± 1.3 мкг/м³, при НБМУ – по $PM_{2.5}$ – 11.4 ± 4.3 мкг/м³, а по PM_{10} – 20.1 ± 6.1 мкг/м³. Однако, при НМУ измеренные концентрации были значительно выше: по $PM_{2.5}$ – 48.5 ± 6.0 мкг/м³, а по PM_{10} – 88.2 ± 7.2 мкг/м³, превысив ПДК_{СС} $PM_{2.5}$ в 1.4

раза, ПДК_{СС} PM_{10} в 1.5 раза. Примеры диаграмм измерений концентраций представлены на рис. 8.

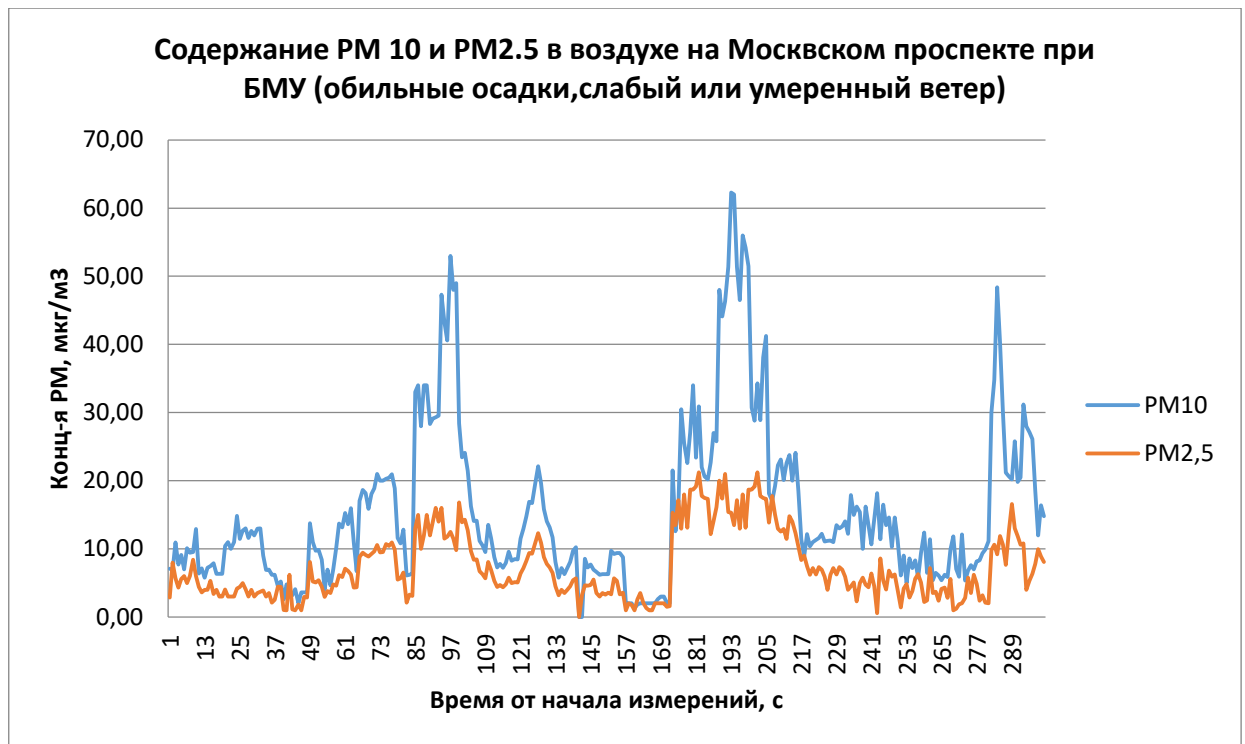


Рисунок 7(а) – Диаграммы *on-line* измерений концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ на Московском проспекте при БМУ

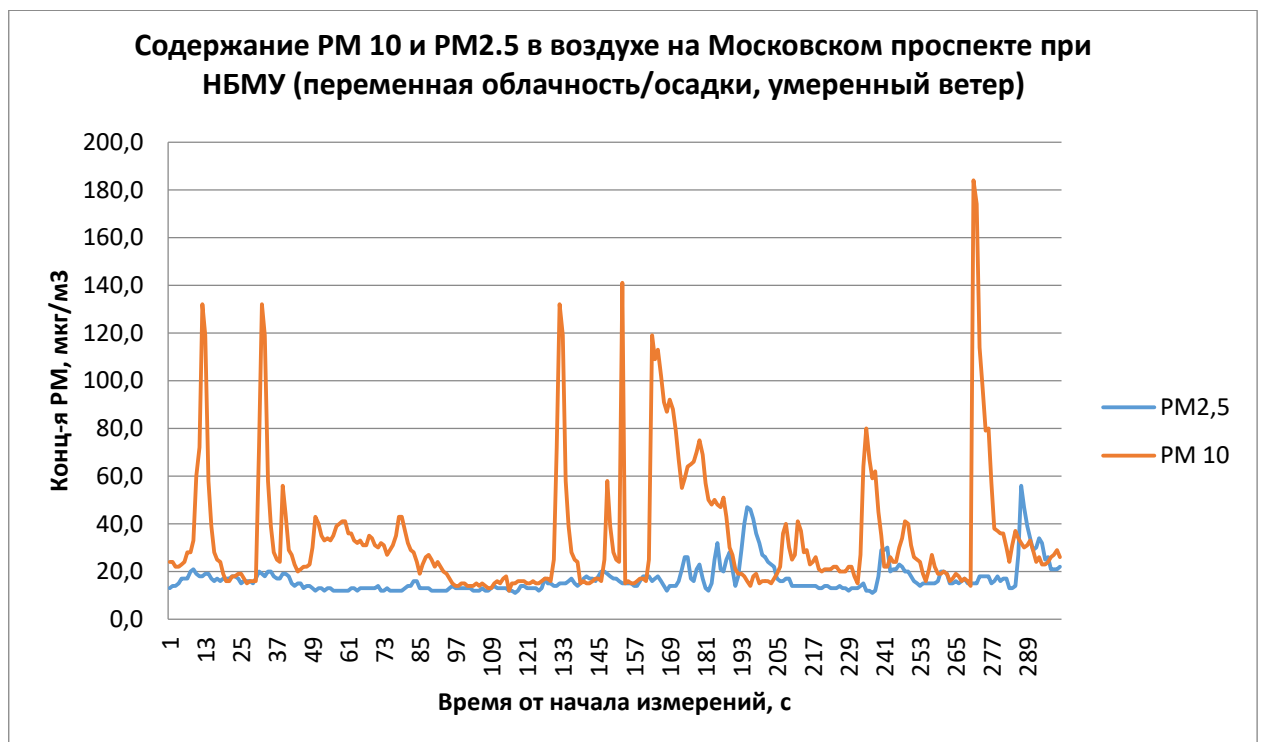


Рисунок 7(б) – Диаграммы *on-line* измерений концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ на Московском проспекте при НБМУ

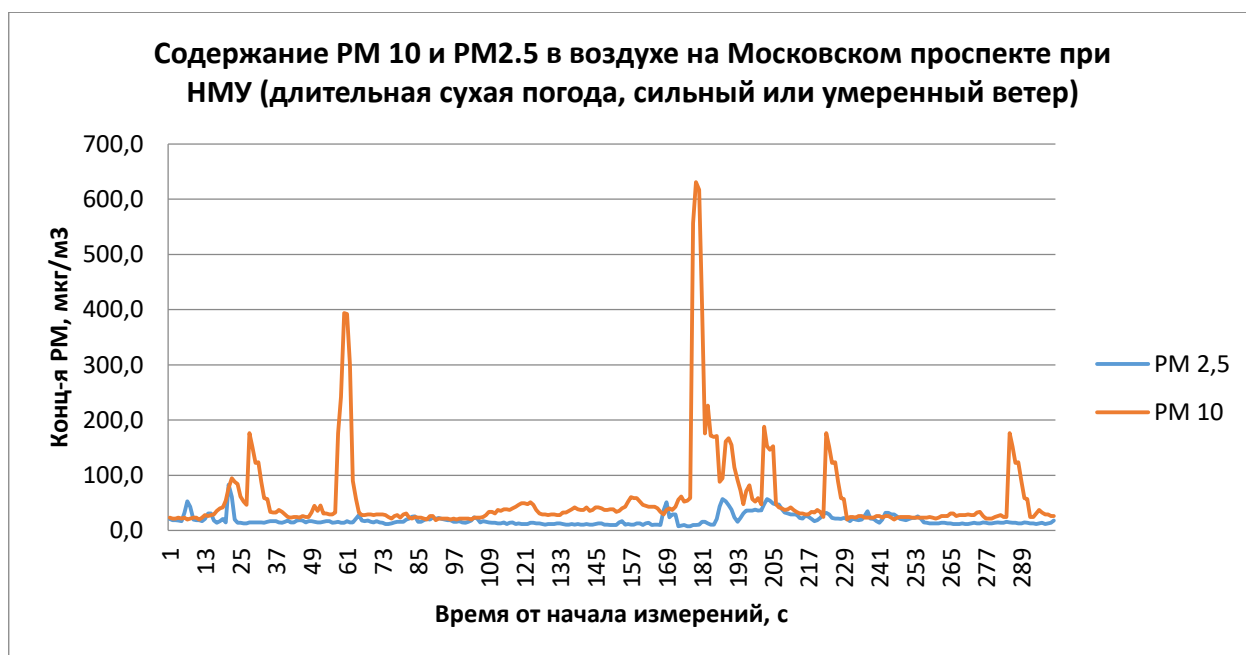


Рисунок 7(в) – Диаграммы *on-line* измерений концентраций PM₁₀ и PM_{2.5} на Московском проспекте при НМУ

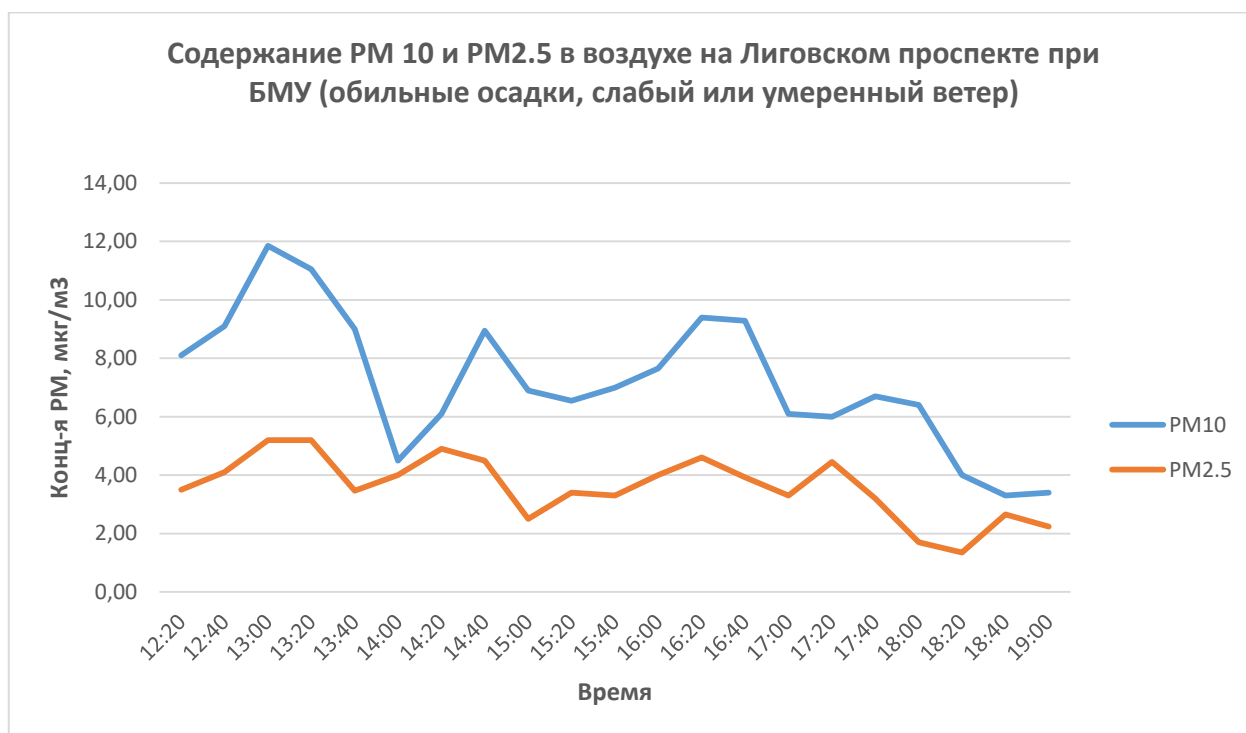


Рисунок 8(а) Динамика изменения концентраций PM₁₀ и PM_{2.5} на Лиговском проспекте при БМУ по результатам измерений мобильной лабораторией Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Правительства Санкт-Петербурга

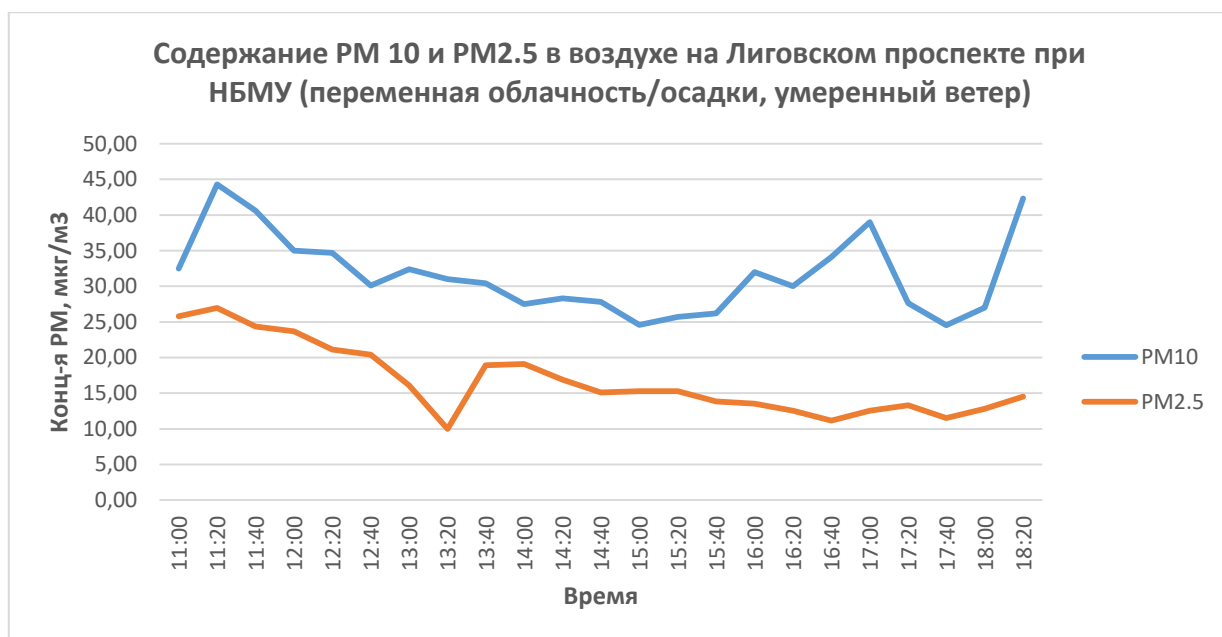


Рисунок 8 (б) – Динамика изменения концентраций РМ₁₀ и РМ_{2.5} на Лиговском проспекте при НБМУ по результатам измерений мобильной лабораторией Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Правительства Санкт-Петербурга

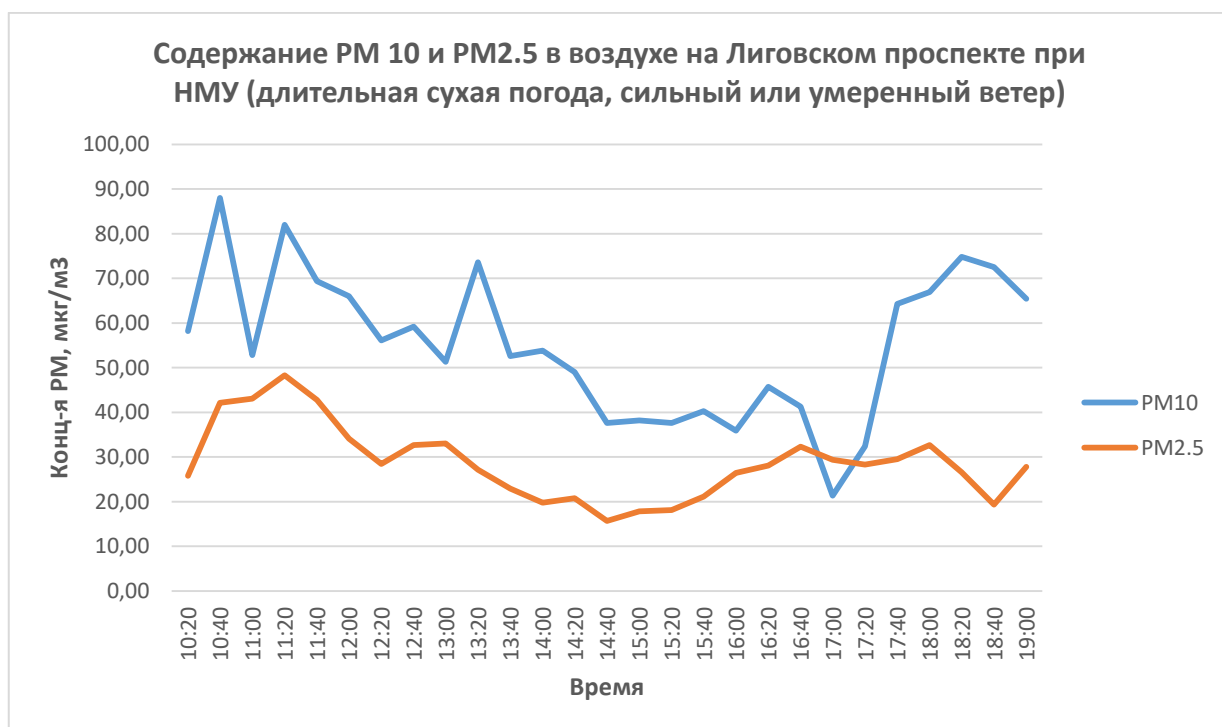


Рисунок 8 (в) – Динамика изменения концентраций РМ₁₀ и РМ_{2.5} на Лиговском проспекте при НМУ по результатам измерений мобильной лабораторией Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Правительства Санкт-Петербурга

На автодорогах с регулируемым движением, открытых для проезда грузового транспорта, – проспекте Славы и Пискаревском проспекте при БМУ и НБМУ значения концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ также оставались в пределах нормативных значений. На пр. Славы содержание в воздухе ВЧ при БМУ составили по $PM_{2.5}$ – 5.0 ± 1.9 мкг/м³, а по PM_{10} – 9.9 ± 3.1 мкг/м³, при НБМУ – по $PM_{2.5}$ – 14.3 ± 4.9 мкг/м³, а по PM_{10} – 28.7 ± 5.6 мкг/м³. На Пискаревском пр. содержание в воздухе ВЧ при БМУ составили по $PM_{2.5}$ – 4.2 ± 1.3 мкг/м³, а по PM_{10} – 10.9 ± 1.1 мкг/м³, при НБМУ – по $PM_{2.5}$ – 12.3 ± 3.4 мкг/м³, а по PM_{10} – 30.5 ± 5.8 мкг/м³. При неблагоприятных метеоусловиях и на проспекте Славы, и на Пискаревском проспекте, было зафиксировано превышение ПДК_{СС} и $PM_{2.5}$ и PM_{10} . На проспекте Славы ПДК_{СС} $PM_{2.5}$ было превышено в 1.3 раза, а ПДК_{СС} PM_{10} в 1.2 раза. На Пискаревском проспекте, где была установлена самая высокая интенсивность движения автотранспорта – 4005 авт/ч, концентрация $PM_{2.5}$ превысила ПДК_{СС} в 1.8 раз, а концентрация PM_{10} – в 2.1 раз. Результаты измерений представлены на рисунках 9 и 10, соответственно.

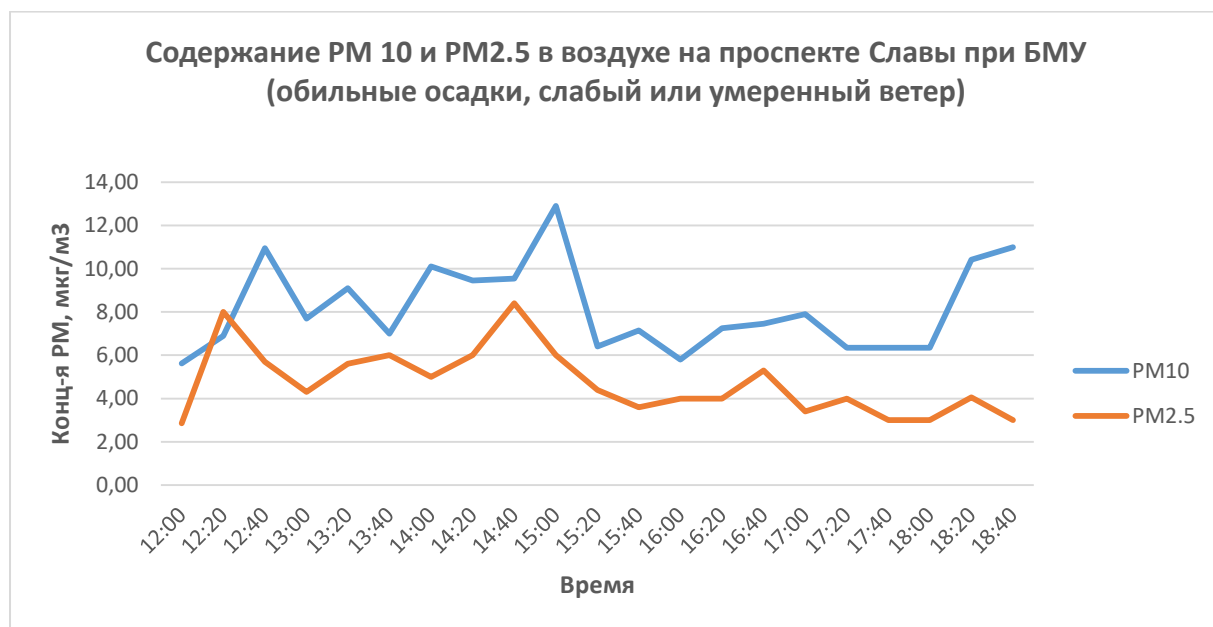


Рисунок 9 (а) – Динамика изменения концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ на проспекте Славы при БМУ по результатам измерений мобильной лабораторией Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Правительства Санкт-Петербурга

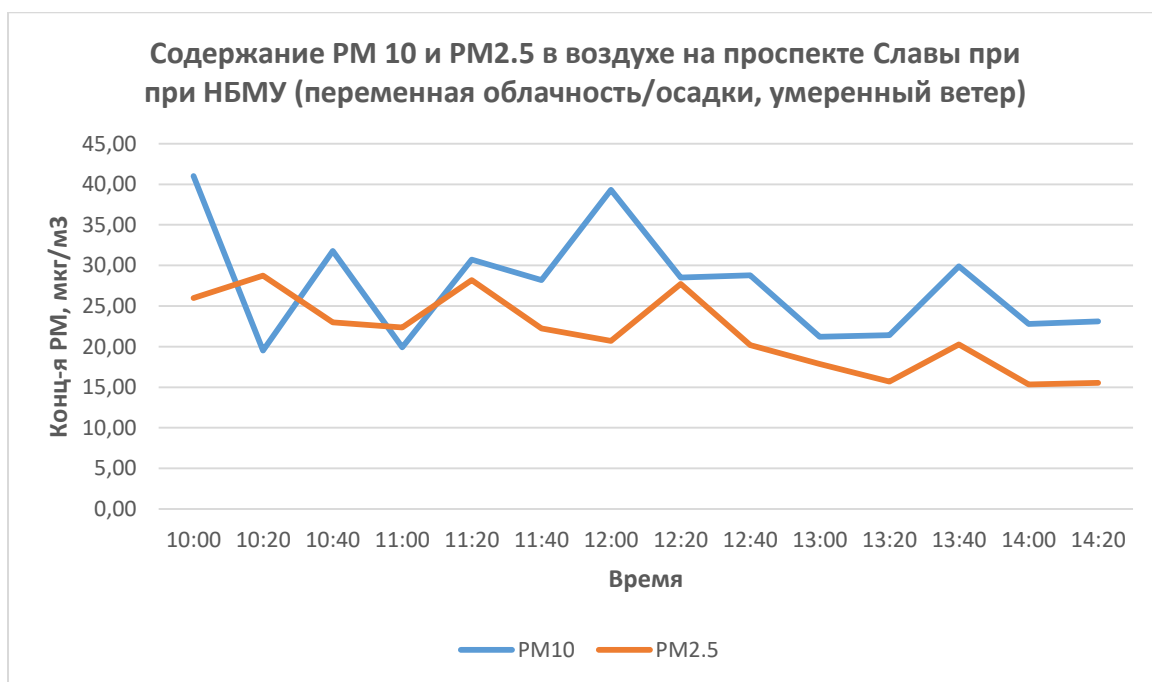


Рисунок 9(б) Динамика изменения концентраций PM₁₀ и PM_{2.5} на проспекте Славы при НБМУ по результатам измерений мобильной лабораторией Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Правительства Санкт-Петербурга

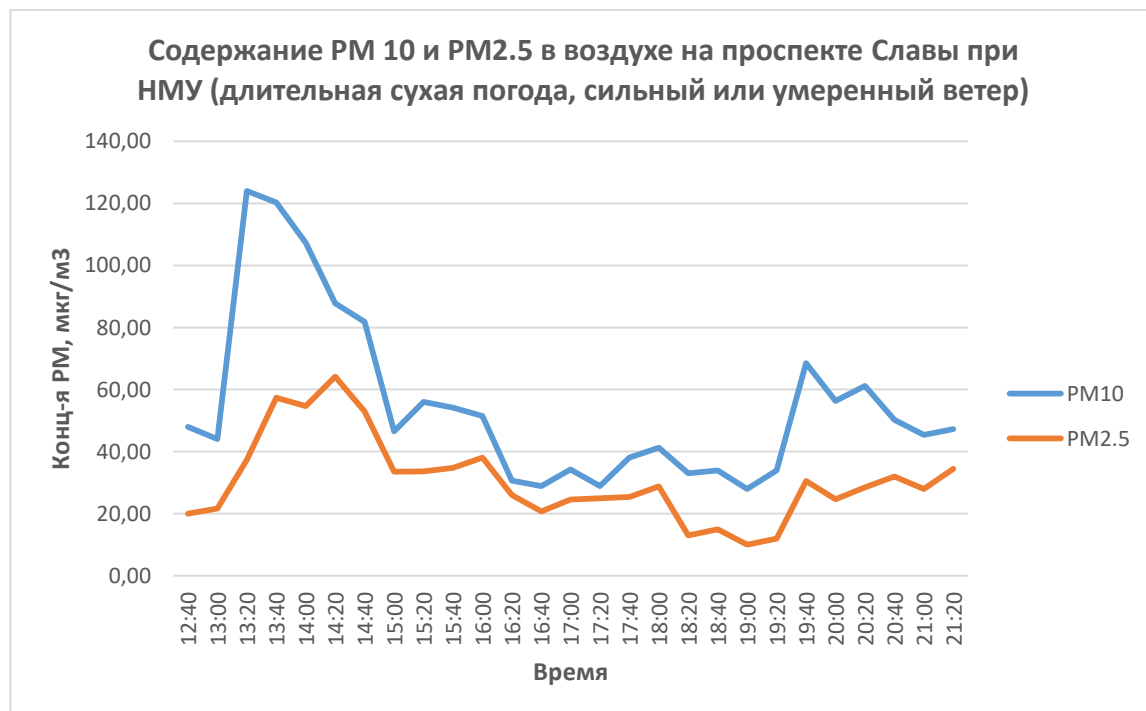


Рисунок 9 (в) – Динамика изменения концентраций PM₁₀ и PM_{2.5} на проспекте Славы НМУ по результатам измерений мобильной лабораторией Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Правительства Санкт-Петербурга

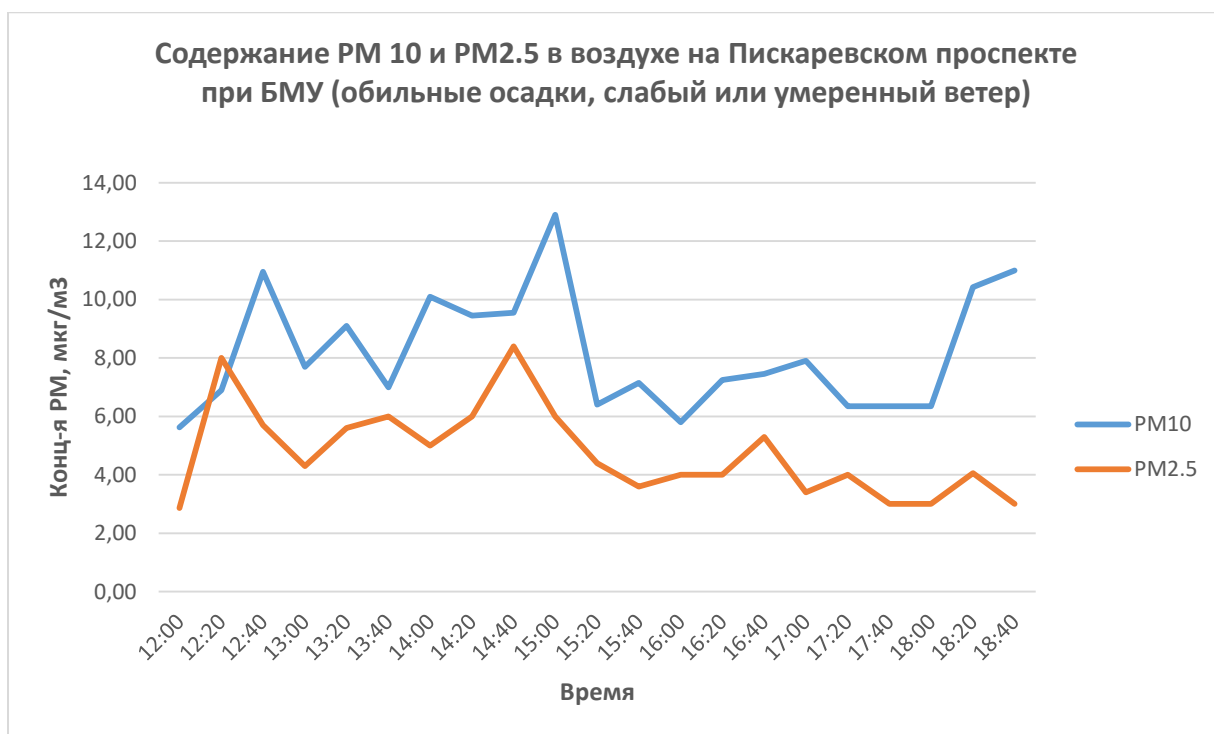


Рисунок 10(а) – Динамика изменения концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ на Пискаревском проспекте при БМУ по результатам измерений мобильной лабораторией Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Правительства Санкт-Петербурга

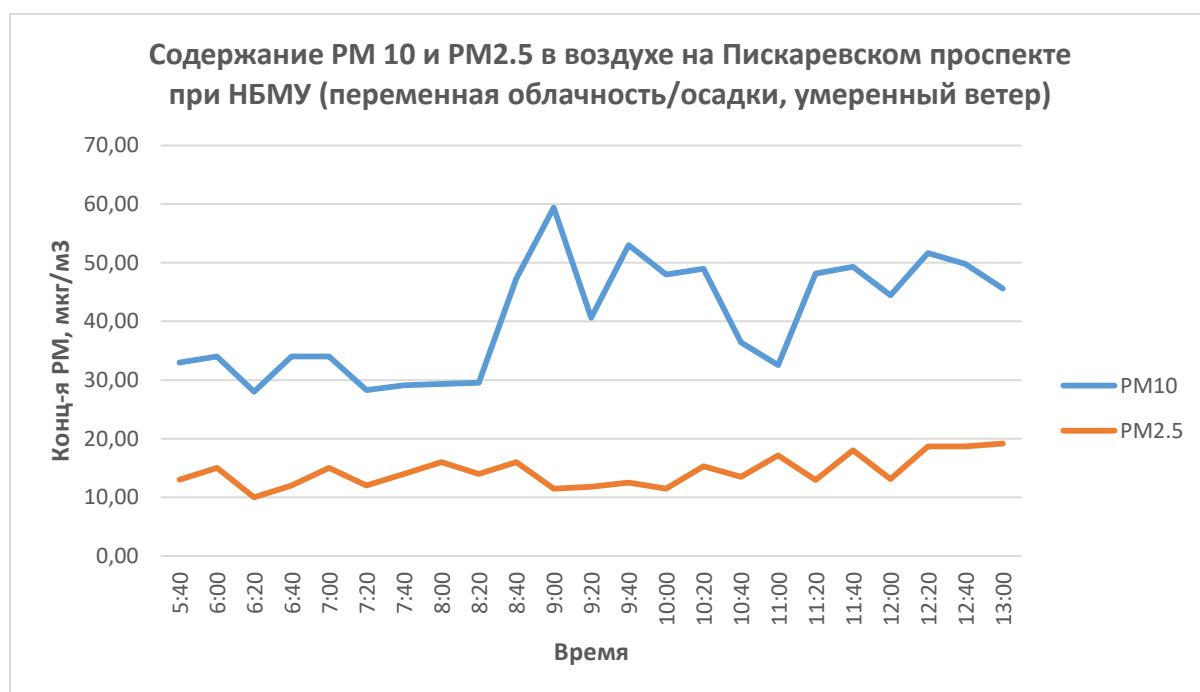


Рисунок 10(б) – Динамика изменения концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ на Пискаревском проспекте при НБМУ по результатам измерений мобильной лабораторией Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Правительства Санкт-Петербурга



Рисунок 10 (в) – Динамика изменения концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ на Пискаревском проспекте при НМУ по результатам измерений мобильной лабораторией Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Правительства Санкт-Петербурга

В ходе исследований на Митрофаньевском шоссе было выявлено, что концентрации взвешенных частиц при БМУ составляют, в среднем, по $PM_{2.5}$ – 8.9 ± 2.4 мкг/м³, а по PM_{10} – 17.0 ± 2.5 мкг/м³, при НБМУ – по $PM_{2.5}$ – 26.3 ± 9.1 мкг/м³, а по PM_{10} – 49.2 ± 18.1 мкг/м³. При НМУ – по $PM_{2.5}$ – 87.9 ± 17.5 мкг/м³, а по PM_{10} – 255.6 ± 37.8 мкг/м³, т.е. ПДК_{СС} $PM_{2.5}$ превышено в 2.5 раза, а ПДК_{СС} PM_{10} – в 4.3 раза. Результаты измерений отражены на рис. 11.

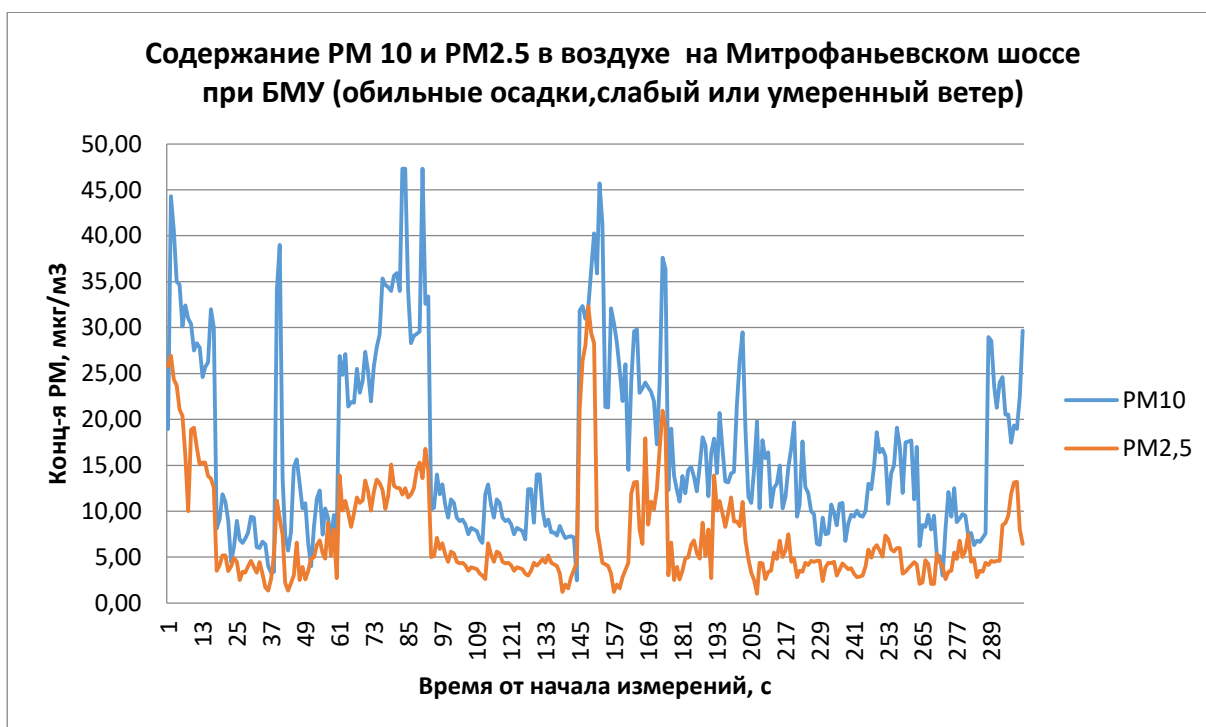


Рисунок 11(а) Диаграммы *on-line* измерений концентраций PM_{2.5} и PM₁₀ на Митрофаньевском шоссе при БМУ



Рисунок 11(б) Диаграммы *on-line* измерений концентраций PM_{2.5} на Митрофаньевском шоссе НБМУ

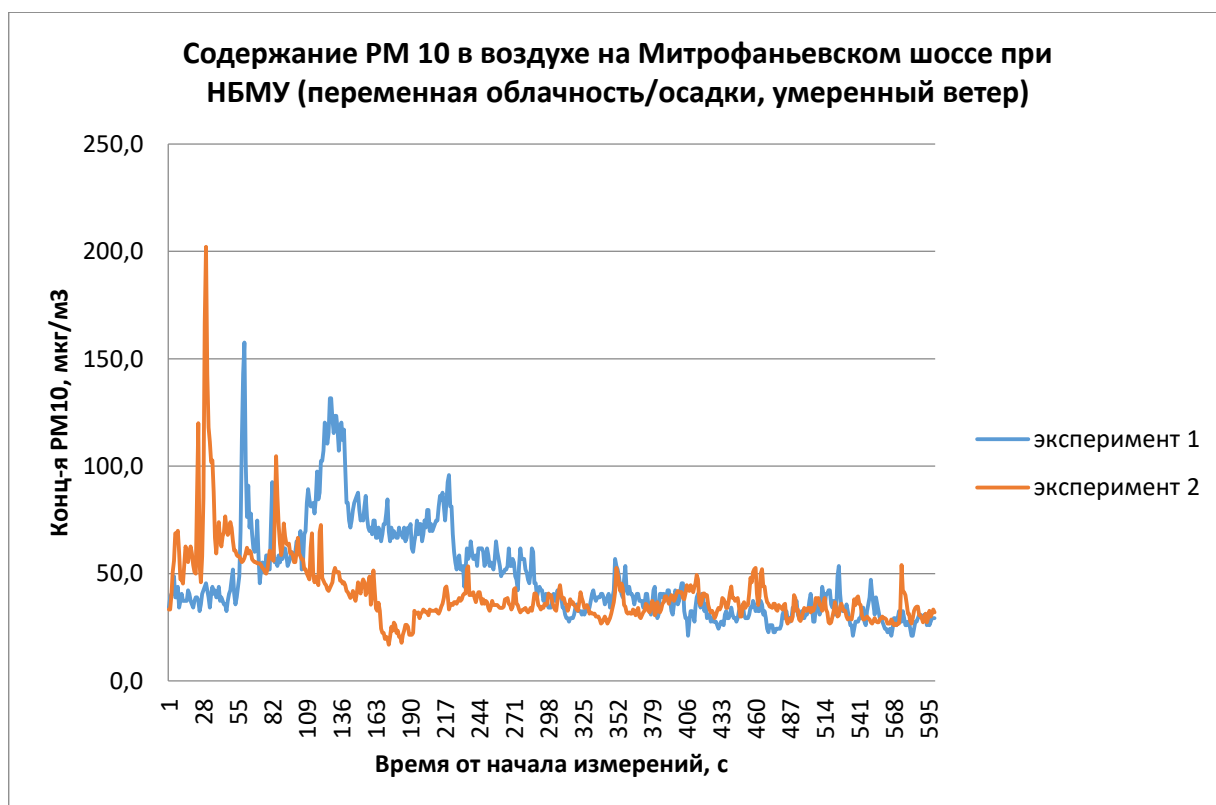


Рисунок 11 (в) – Диаграммы *on-line* измерений концентраций PM₁₀ на Митрофаньевском шоссе при НБМУ



Рисунок 11(г) Диаграммы *on-line* измерений концентраций PM_{2.5} на Митрофаньевском шоссе при НМУ

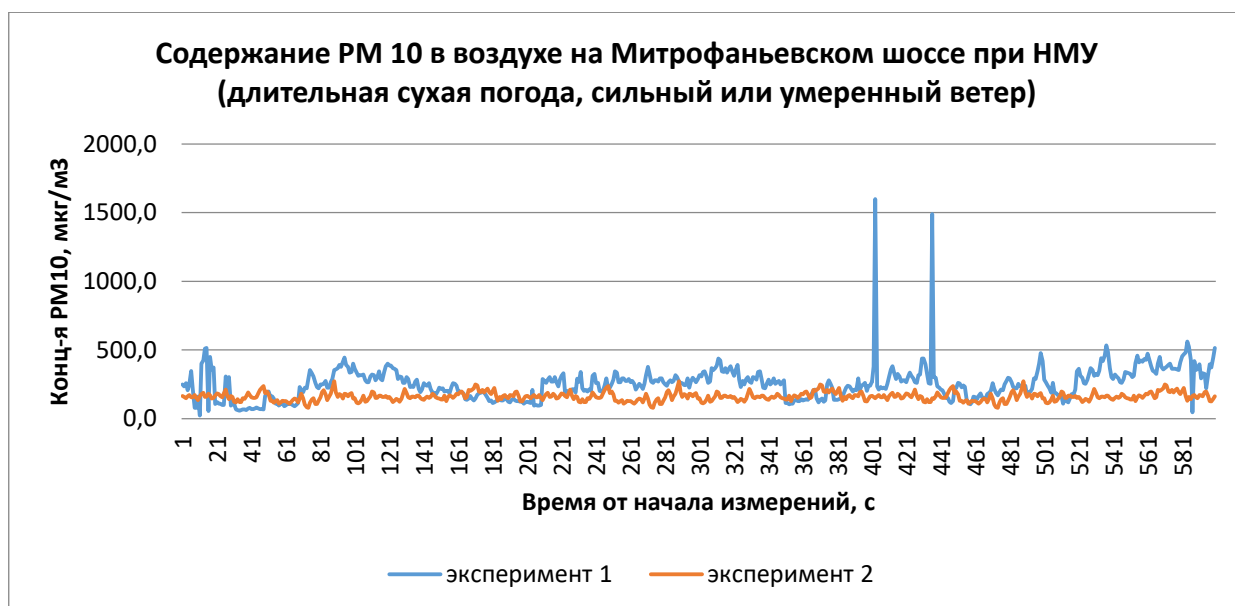


Рисунок 11 (д) – Диаграммы *on-line* измерений концентраций PM_{10} на Митрофаньевском шоссе при НМУ

В результате полевых измерений на Колтушском шоссе было установлено, что концентрации взвешенных частиц при БМУ составили, в среднем, по $PM_{2.5}$ – 14.1 ± 2.9 мкг/м³, а по PM_{10} – 18.8 ± 5.2 мкг/м³, при НБМУ – по $PM_{2.5}$ – 21.7 ± 9.4 мкг/м³, а по PM_{10} – 59.4 ± 28.3 мкг/м³. При НМУ также имело место опасно высокое превышение ПДК_{СС}: по $PM_{2.5}$ в 2.6 раза, а по PM_{10} – 3.7 раз. Результаты измерений отражены на рис. 12.

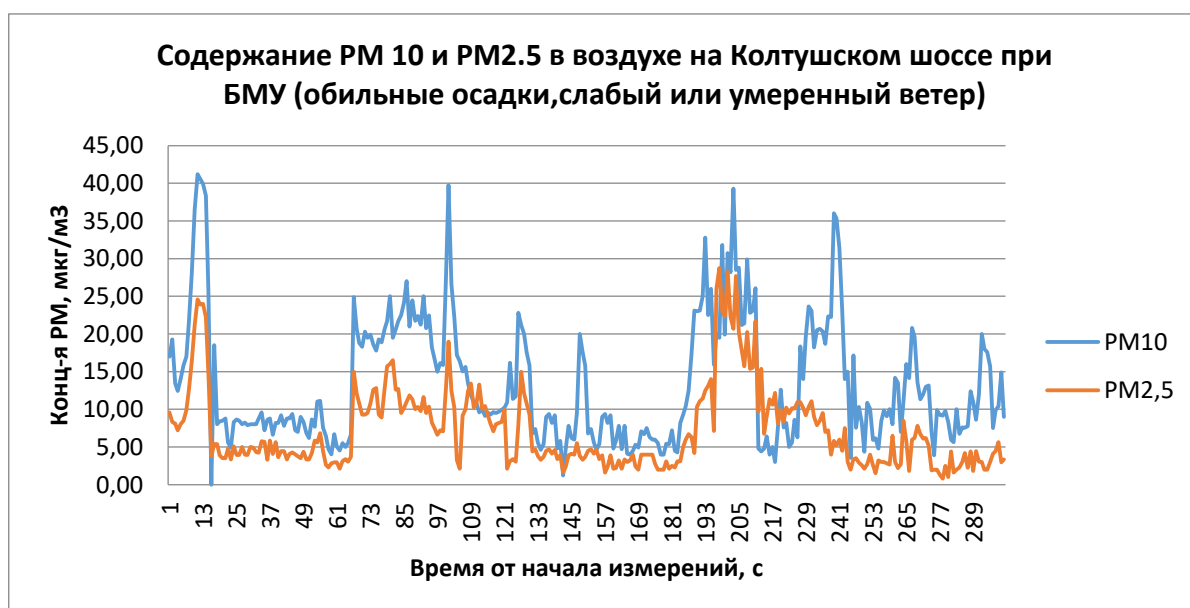


Рисунок 12(а) – Диаграммы *on-line* измерений концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ на Колтушском шоссе при БМУ

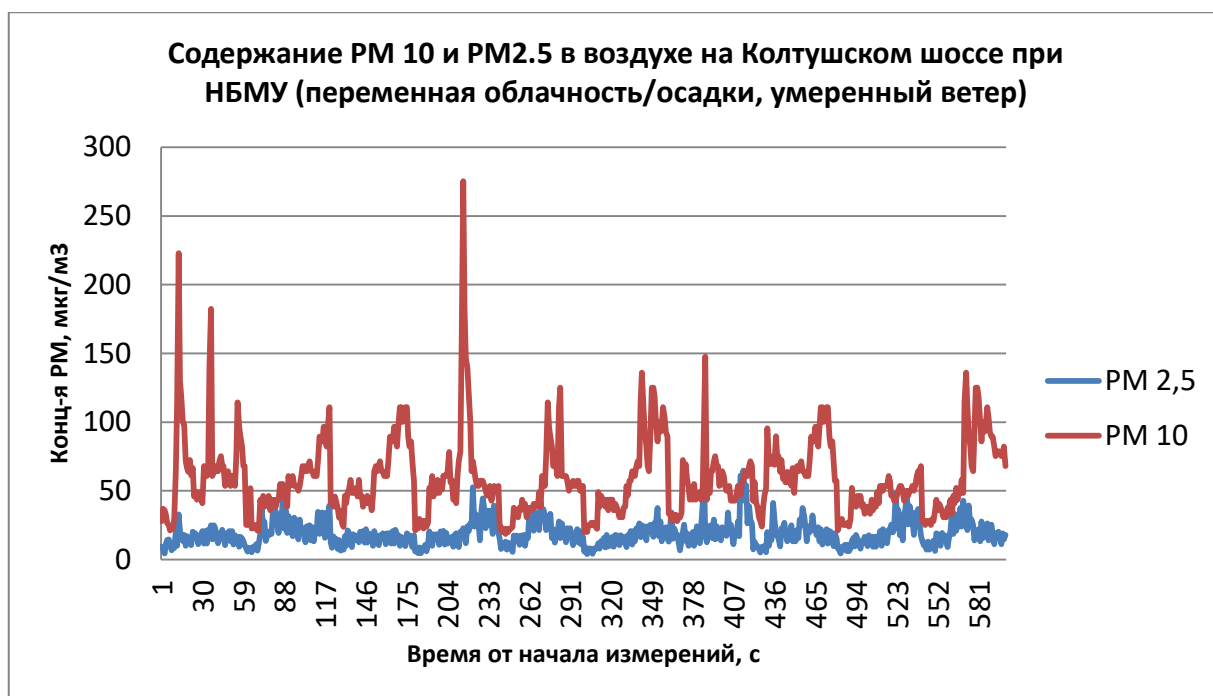


Рисунок 12(б) – Диаграммы *on-line* измерений концентраций PM₁₀ и PM_{2.5} на Колтушском шоссе при НБМУ

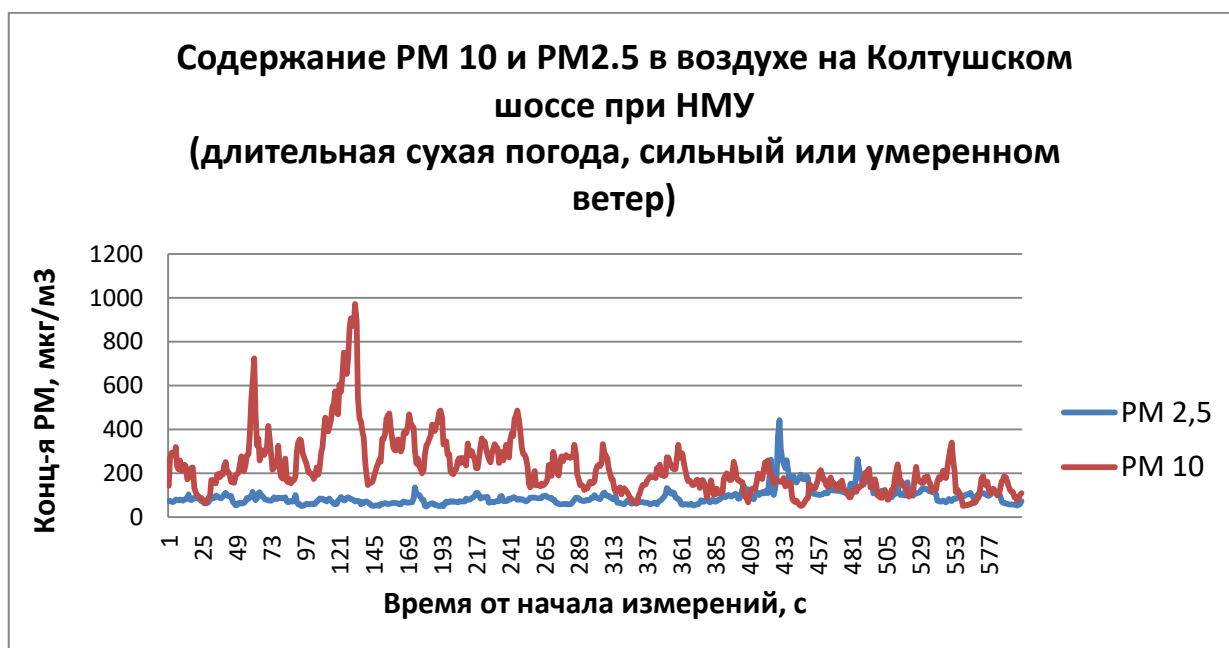


Рисунок 12(в) – Диаграммы *on-line* измерений концентраций PM₁₀ и PM_{2.5} на Колтушском шоссе при НМУ

Как и ожидалось, самые высокие значения концентраций взвешенных частиц были зафиксированы на КАД Санкт-Петербурга, которые при БМУ, в среднем, составили по PM_{2.5} – 21.1 ± 1.5 мкг/м³, а по PM₁₀ – 27.3 ± 2.2 мкг/м³, при

НБМУ – по $PM_{2.5}$ – 30.0 ± 16.3 мкг/м³, а по PM_{10} – 63.4 ± 26.1 мкг/м³, при НМУ – по $PM_{2.5}$ – 116.7 ± 35.8 мкг/м³, а по PM_{10} – 230.8 ± 31.4 мкг/м³. Полученные результаты свидетельствуют о чрезвычайно высоком загрязнении воздуха на КАД при высокой транспортной загрузке и неблагоприятных метео- и дорожных условиях: превышение ПДК_{СС} $PM_{2.5}$ – в 3.3 раза, а ПДК_{СС} PM_{10} – в 3.8 раз. Результаты измерений отражены на рис. 13.

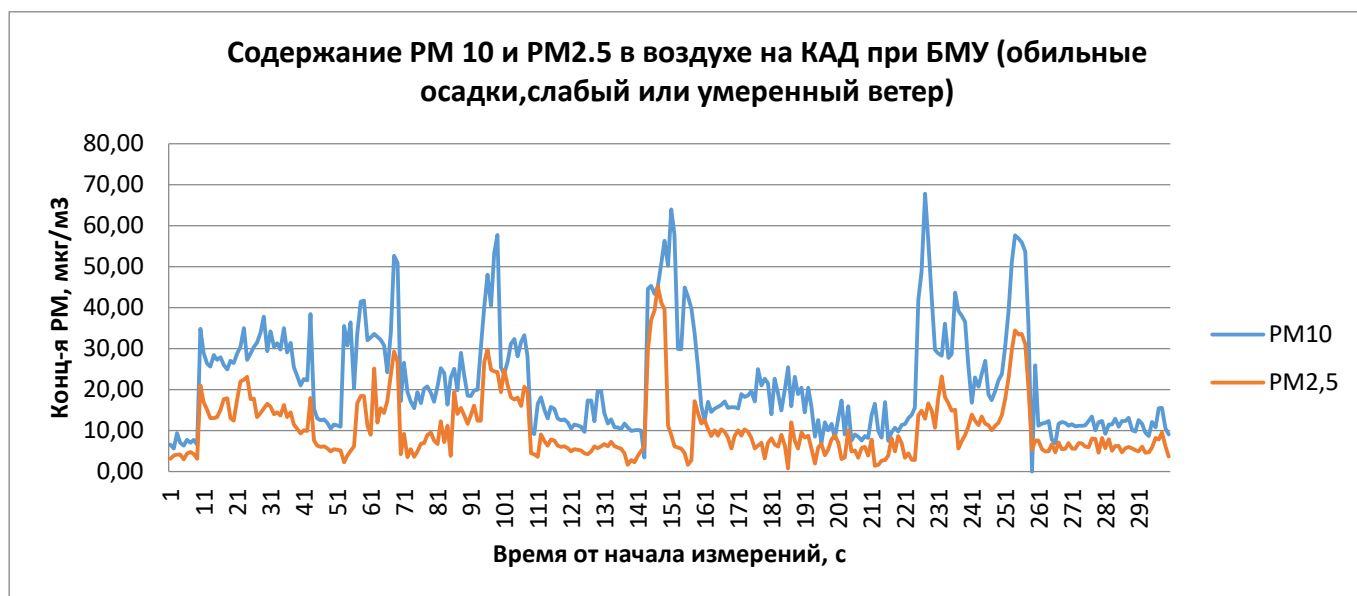


Рисунок 13 (а) – Диаграммы *on-line* измерений концентраций $PM_{2.5}$ и PM_{10} на КАД Санкт-Петербурга при БМУ

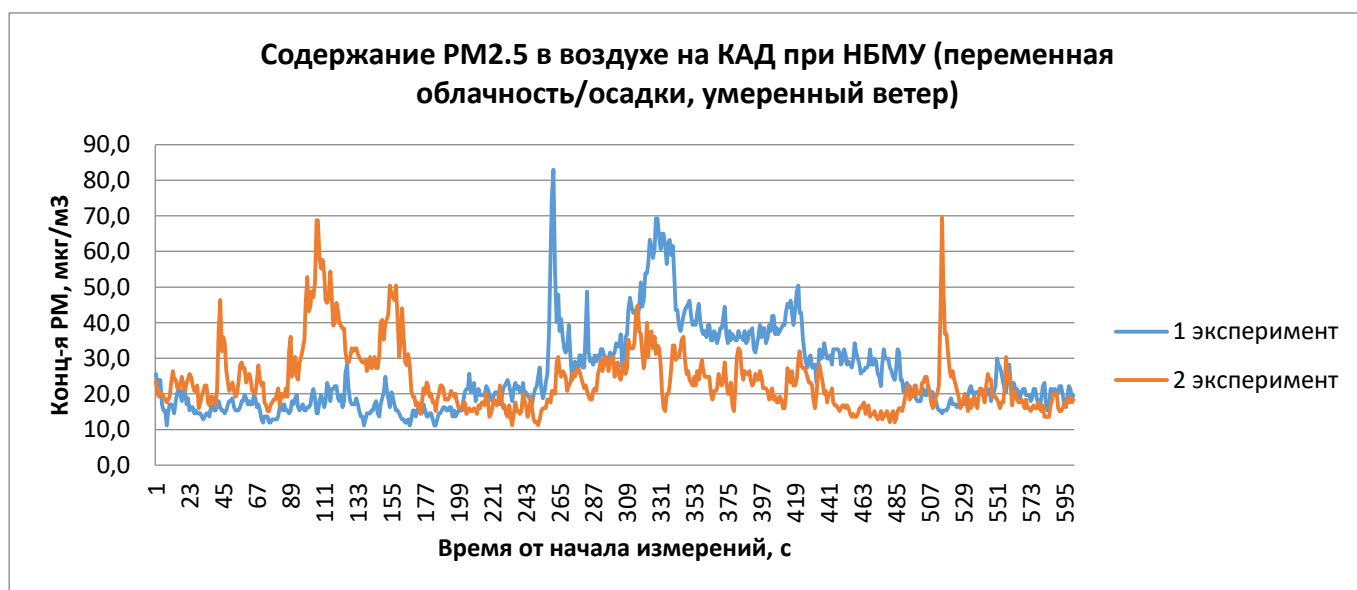


Рисунок 13 (б) – Диаграммы *on-line* измерений концентраций $PM_{2.5}$ и PM_{10} на КАД Санкт-Петербурга при НБМУ

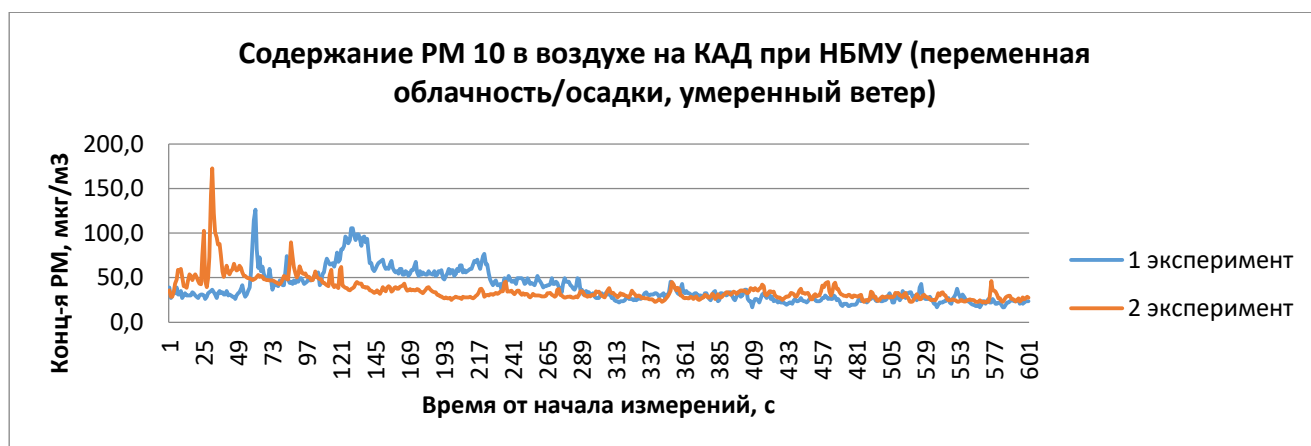


Рисунок 13 (в) – Диаграммы *on-line* измерений концентраций РМ₁₀ на КАД Санкт-Петербурга при НБМУ

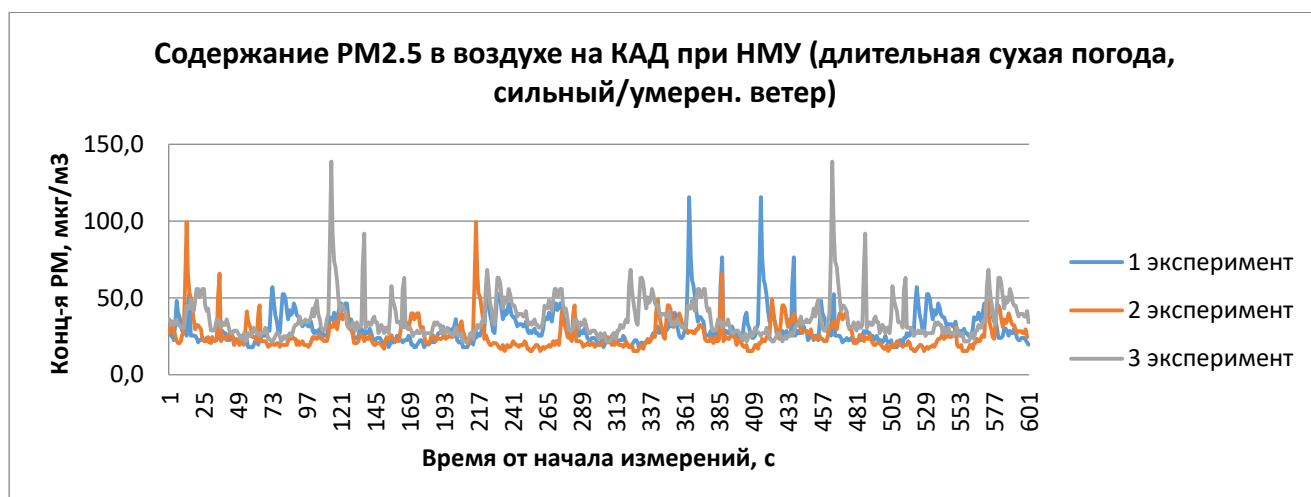


Рисунок 13 (г) – Диаграммы *on-line* измерений концентраций РМ_{2.5} на КАД Санкт-Петербурга при НМУ

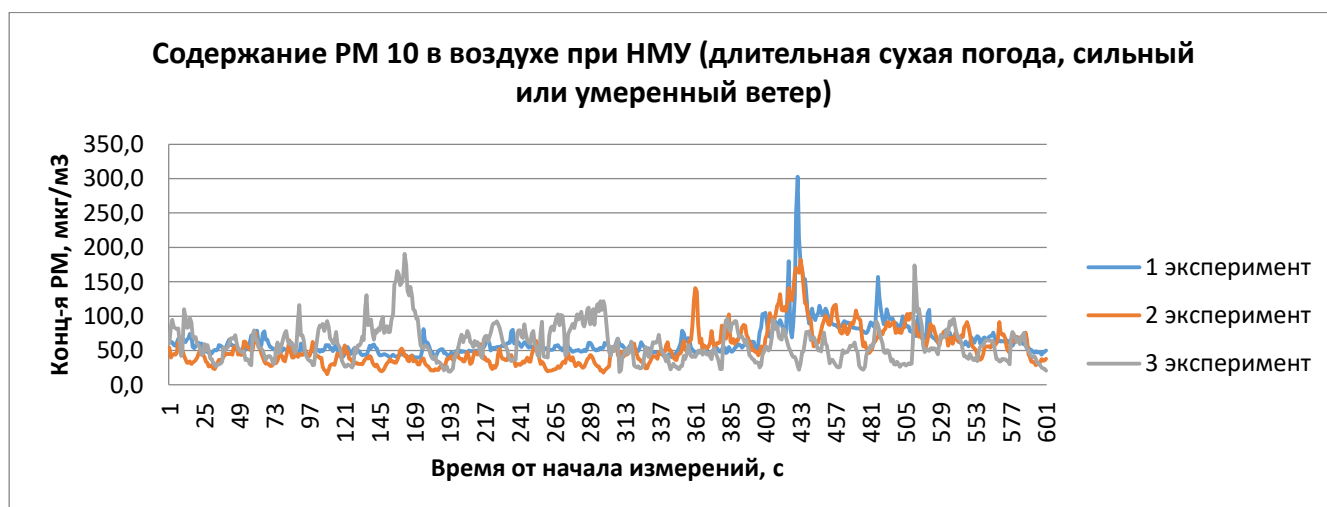


Рисунок 13 (д) – Диаграммы *on-line* измерений концентраций РМ₁₀ на КАД Санкт-Петербурга при НМУ

Все усредненные значения результатов измерений представлены в итоговой таблице 6.

Таблица 6 – Концентрация ВЧ на автомагистралях Санкт-Петербурга при высокой транспортной нагрузке и разных гидрометеорологических условиях.

Магистраль	Усредненные концентрации ВЧ, мкг/м ³					
	Благоприятные метеоусловия для осаджения частиц (БМУ)		Нормальные (часто встречающиеся) благоприятные метеоусловия (НБМУ)		Неблагоприятные метеоусловия для осаджения частиц (НМУ)	
	Обильные осадки, высокая влажность, слабый/умеренный ветер		Переменная облачность/ осадки, умеренная влажность, слабый/умеренный ветер		Длительная ясная сухая погода, умеренная влажность, умеренный/сильный ветер	
	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
Дороги с регулируемым движением, свободные от проезда грузового транспорта						
Московский пр.	8.0±3.6	4.4±0.6	34.2 ±17.4	17.3±6.3	57.6±37.2	19.2±10.2
Лиговский пр.	7.8±1.3	3.8±1.4	20.1 ±6.1	11.4±4.3	88.2±7.2	48.5±6.0
Дороги с регулируемым движением, разрешенные для проезда грузового транспорта						
Пр. Славы	9.9±3.1	5.0±1.9	28.7±5.6	14.3±4.9	72.4±7.1	46.4±8.1
Пискаревский пр.	10.9±1.1	4.2±1.3±	30.5±5.8	12.3±3.4	124.5±7.2	64.2±8.3
Шоссейные дороги с регулируемым движением, разрешенные для проезда грузового транспорта						
Колтушское ш.	18.8±5.2	14.1±2.9	59.4±28.3	21.7±9.4	223.5±77.2	91.8±32.3
Митрофан-е. ш.	17.0±2.5	8.9±2.4	49.2±18.1	26.3±9.1	255.6±37.8	87.9±17.5
Скоростная автодорога						
КАД СПб	27.3±2.2	21.8±1.5	63.4±26.1	30.0±16.0	230.8±31.4	116.7±35.8

Анализ полученных данных, приведенных в таблице 5, позволяет сделать следующие выводы [160-162]:

- Вблизи автодорог с потоками автотранспорта от 2500 до 4000 авт/ч, свободных от проезда грузового транспорта (Московский и Лиговский проспекты), и с долей грузового транспорта до 10 % (проспект Славы, Пискаревский проспект, Митрофаньевское шоссе, Колтушское шоссе), при

благоприятных и нормальных благоприятных (наиболее типичных для Санкт-Петербурга) метеорологических условиях (БМУ и НБМУ), концентрации взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ не превышают ПДК_{СС}, установленные в РФ, изменяясь в пределах 10-60 мкг/м³ и 3-35 мкг/м³, соответственно.

- Учитывая, что НБМУ достаточно часто наблюдаются в Санкт-Петербурге, целесообразно оценивать уровень загрязнения воздуха ВЧ именно по этим показателям и проводить сравнение результатов измерений не со среднесуточными ПДК, а со среднегодовыми (таблица 2). Сравнительный анализ полученных данных со значениями ПДК_{СГ} выявил, что на Митрофаньевском шоссе и Колтушском шоссе наблюдалось превышение ПДК_{СГ} PM_{10} в 1.4 и 1.7 раз, соответственно, концентрации $PM_{2.5}$ в целом не выходили за пределы норматива. Следует также подчеркнуть, что российские нормативные значения в отношении регламентирования ПДК $PM_{2.5}$ и PM_{10} значительно менее жесткие, чем стандарты, рекомендованные ВОЗ и принятые в ЕС (таблица 2). Сравнение результатов измерений, полученных на автодорогах с регулируемым движением при НБМУ, со значениями ПДК_{СГ} $PM_{2.5}$ и ПДК_{СГ} PM_{10} , установленными ВОЗ, указывает на то, что ПДК_{СГ} PM_{10} превышено в 1.5-3 раза, а ПДК_{СГ} $PM_{2.5}$ превышено в 1.2-2.6 раз.

- На наиболее загруженных участках КАД Санкт-Петербурга, с высокой интенсивностью движения от 7500 до 13000 авт/ч и высокой долей тяжелого дизельного грузового транспорта (до 25 %), при НБМУ наблюдалось превышение содержания PM_{10} и $PM_{2.5}$ относительно ПДК_{СГ} до 1.8 и 1.2 раз, соответственно, а нормативы ВОЗ были превышены, соответственно, в 2.5 и 3 раза.

- В ходе экспериментальных исследований было установлено, что при сочетании высокой загрязненности дорожной среды грязевыми отложениями, характерной для Санкт-Петербурга в весенний период, и неблагоприятных метеоусловий (длительной ясной сухой погоде, низкой/умеренной влажности, умеренном или сильном ветре), способствующих устойчивому витанию в воздухе ВЧ, на автомагистралях города и в их окрестностях формируются **опасно высокие** концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$, превышающие ПДК_{СС} в 2-4.5 и 1.2-3.5 раза,

соответственно. На Лиговском проспекте, проспекте Славы и Пискаревском проспекте ПДК_{СС} РМ_{2.5} были превышены в 1.3-1.8 раз, а ПДК_{СС} РМ₁₀ в 1.2-2.1 раза. На автомагистралях с долей грузового транспорта от 10 % и более – Митрофаньевском шоссе, Колтушском шоссе и КАД, – ПДК_{СС} РМ_{2.5} была превышена в 2.5-3.3 раза, а ПДК_{СС} РМ₁₀ в 3.3-4.3 раз.

Независимо от метеорологических условий, на дорогах города периодически отмечаются **эпизоды чрезвычайного локального загрязнения воздушной среды ВЧ с многократным превышением ПДК_{мр} (до 20 и более раз)**. Такие явления наблюдаются при проведении дорожных и земляных работ, сухой уборке городских улиц, при проезде сильно дымящих грузовых автомобилей или грузовых автомобилей с пылящими сыпучими материалами.

В частности, дорожные измерения на КАД Санкт-Петербурга, для которой характерны интенсивные потоки крупнотоннажного грузового транспорта, показали периодическое краткосрочное (в течение нескольких секунд) резкое повышение концентраций РМ₁₀ и РМ_{2.5} до значений, многократно (в 5-50 раз) превышающих ПДК. В качестве примера, на рис. 14, приведены диаграммы зафиксированных мною локально-временных флуктуаций концентраций РМ₁₀ при проезде рядом с местом измерения колонны грузовых автомобилей с песком (рис. 14а) и при проезде старого сильно дымящего грузового автомобиля (рис. 14б).

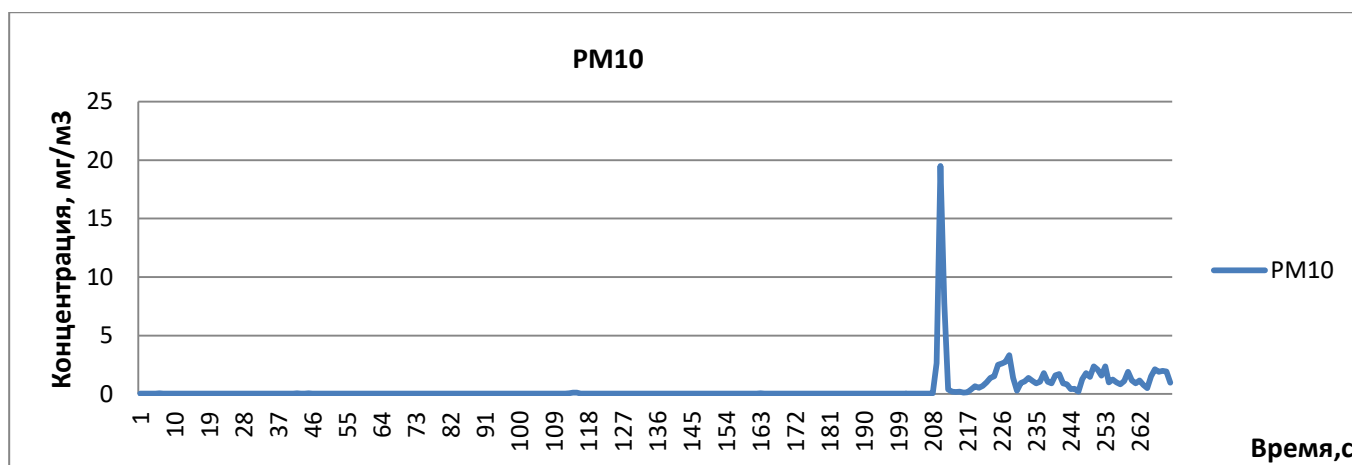


Рисунок 14(а) – Флуктуации в изменении концентраций РМ₁₀ на КАД Санкт-Петербурга, зарегистрированные 2 апреля 2015 г. с 17:15 до 17:20 при проезде сильно дымящего грузового автомобиля

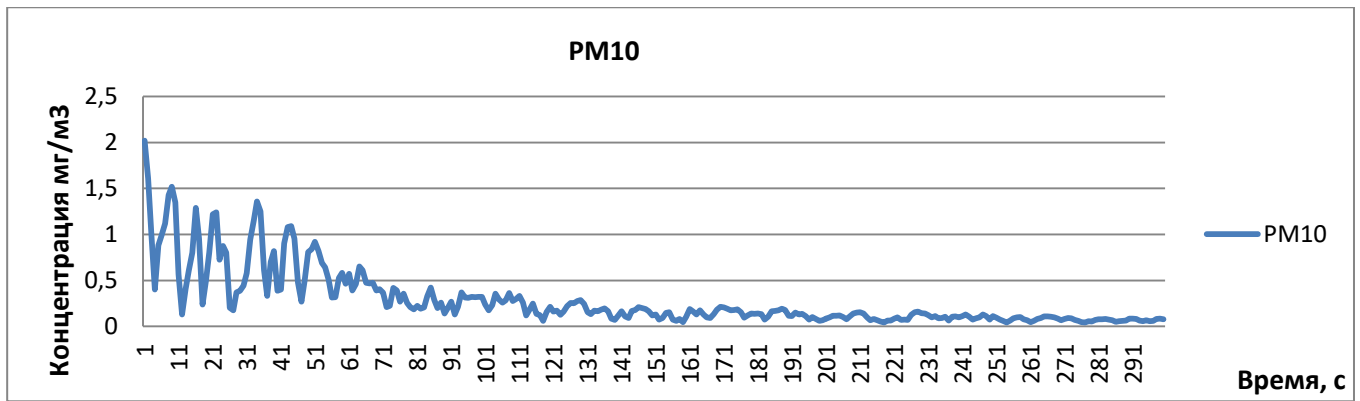


Рисунок 14(б) – Флуктуации в изменении концентраций PM_{10} на КАД Санкт-Петербурга, зарегистрированные 2 апреля 2015 г. с 17:21 до 17:26 при проезде автоколонны с песком

Принимая во внимание вероятность присутствия на дорогах взвешенных частиц с адсорбированными на них продуктами неполного сгорания топлива, в том числе канцерогенных ПАУ, и тяжелыми металлами, можно допустить, что на таких участках формируются локальные зоны чрезвычайного загрязнения воздуха ВЧ, представляющие наибольшую опасность для участников движения.

В дальнейшем были организованы и проведены полевые эксперименты по измерению концентраций $PM_{2.5}$ и PM_{10} на сильно запыленном участке автомобильной дороги в «следе» движущейся уборочной машины (рис. 15).



Рисунок 15 – Пыление при сухой уборке Свердловской набережной Санкт-Петербурга (март 2016 г.)

Проведенные дорожные измерения на Свердловской Набережной Санкт-Петербурга показали, что в следе уборочной машины, якобы очищающей обочины автодороги от грязевых отложений, концентрация PM_{10} составила 69115

$\pm 1\,554 \text{ мкг/м}^3$ (ПДК_{мр} превышено в 230 раз), а $\text{PM}_{2.5} - 34\,183 \pm 876 \text{ мкг/м}^3$ (ПДК_{мр} превышено в 213 раз). Очевидно, что в таких условиях участники движения оказываются в чрезвычайной ситуации экстремального загрязнения приземной воздушной среды мелкодисперсными ВЧ, длительное пребывание в которой (более 20 минут) представляет угрозу их здоровью.

Объемные грязевые отложения на дорожном полотне (толщиной до нескольких сантиметров), которые образуются в местах выезда грузового транспорта со строительных площадок, в местах ремонта дорог со снятием асфальтового покрытия и в весеннее время после таяния грязевых наледей на дорожных обочинах, являются одним из основных источников формирования экстремально высоких концентраций ВЧ на автодорогах за счет образования вторичной взвеси под действием движущегося транспорта или при сухой уборке магистрали.

2.5 Результаты исследования дисперсного состава взвешенных частиц в придорожном воздухе

Как отмечалось в разделе 1.1.2, посвященном описанию токсических характеристик ВЧ, наибольшей опасностью обладают частицы с меньшим диаметром – $\text{PM}_{2.5}$. Кроме того, соотношение $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ в некоторой степени характеризует вклад эмитируемых сажевых частиц ($\text{PM}_{2.5}$) в общем количестве ВЧ, генерируемых при транспортном процессе. Поэтому было целесообразно определить дисперсный состав ВЧ и долю (процентное содержание) частиц $\text{PM}_{2.5}$ во фракции PM_{10} при разных метеорологических условиях. Зная долю $\text{PM}_{2.5}$ в общей фракции, можно расчетным путем определять концентрацию $\text{PM}_{2.5}$, исходя из концентрации PM_{10} . Это важно, поскольку большинство автоматизированных станций мониторинга загрязнения атмосферного воздуха в городах оборудованы анализаторами PM_{10} . На основании данных измерений был проведен анализ дисперсного состава ВЧ по соотношению $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ при благоприятных,

нормальных благоприятных и неблагоприятных метеоусловиях, результаты которого представлены в таблице 7 и на рисунке 16.

Таблица 7 – Динамика изменения соотношения $PM_{2.5}/PM_{10}$ при БМУ, НБМУ и НМУ на автомагистралях Санкт-Петербурга.

Магистраль	$PM_{2.5}/PM_{10}$		
	БМУ	НБМУ	НМУ
Московский проспект	47.06	49.25	33.33
Лиговский проспект	49.25	53.85	51.52
Проспект Славы	69.49	78.57	53.85
Пискаревский проспект	58.73	56.25	36.99
Митрофаньевское шоссе	42.86	53.85	25.00
Колтушское шоссе	53.85	63.93	31.58
КАД	66.67	51.52	47.06
$\bar{x}$	53.18	55.42	44,89
$D_{\text{выб.}}$	62.17	167.75	248.20
СКО	7.88	12.95	15.75

Примечания: $\bar{x}$ – средние значения рассматриваемых выборок, $D_{\text{выб.}}$ – дисперсия, СКО –среднеквадратичное отклонение.

Для проверки математической значимости различий и сходимости соотношений $PM_{2.5}/PM_{10}$, полученных для разных погодных условий, целесообразно применить статистический тест Т-критерий Стьюдента [163]. Т – критерий является наиболее часто используемым методом, позволяющим путем последовательного попарного сравнения выявить различие между двумя выборками данных.

Данный критерий используется в тех случаях, когда полученные средние значения двух выборок независимых величин незначительно различаются и надо проверить, можно ли объяснить это различие только случайной ошибкой, т.е., принадлежат ли эти средние нормально распределенной генеральной совокупности.

Для сравнения стандартных отклонений результатов, полученных при разных метеоусловиях, был использован F-критерий [163]. Данный критерий используется, если необходимо сравнить две различные по величине оценки стандартных отклонений s_1 и s_2 со степенями свободы f_1 и f_2 , соответственно, (в

данном случае $f_1 = f_2 = 5$). Определяется, лежит ли различие между стандартными отклонениями в границах возможных случайных колебаний. В случае выполнения данного предположения, отношение s_1/s_2 соответствует F-распределению со степенями свободы f_1 и f_2 . Поэтому получаем:

$$F = s_1/s_2 \quad (1)$$

Это отношение должно быть больше единицы, поскольку большее из двух стандартных отклонений стоит всегда в числителе. Если $F > F(P, f_1, f_2)$, то в этом случае между оценками s_1 и s_2 существует значимое различие, если $F < F(P, f_1, f_2)$, – наблюдаемое различие считается незначимым.

Результаты расчета F-критерия показали, что для полученных соотношений $PM_{2.5}/PM_{10}$ данный критерий варьируется в пределах 1.21-1.99, что меньше критического значения $F(P, f_1, f_2) = 5.05$. Таким образом, все полученные значения СКО можно рассматривать как оценку одной и той же дисперсии генеральной совокупности с нормальным распределением.

Если значимое различие между стандартными отклонениями двух выборок s_1 и s_2 не обнаруживается, то t-критерий рассчитывается по выражению:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s} \sqrt{\frac{n}{2}} \quad (2)$$

Где $\bar{x}_1$ и $\bar{x}_2$ – средние значения сравниваемых выборок, n – количество измерений, в анализируемой задаче $n_1 = n_2 = n$, s – стандартное отклонение для разности двух средних, которое вычисляется по формуле (3):

$$s = \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}} \quad (3)$$

Вычисленную по уравнению (2) величину сравнивают с табличным значением $t(P, f)$, где f – число степеней свободы $f, f = n_1 + n_2 - 2$, а P – уровень значимости ($P = 0.05$). Если $t > t(P, f)$, то между двумя средними $\bar{x}_1$ и $\bar{x}_2$ проявляется значимое различие. Табличное значение t равняется 2.4. Т-критерий для $PM_{2.5}/PM_{10}$ при БМУ и НБМУ составил 0.73, при БМУ и НМУ – 2.56, при

НБМУ и НБМУ – 2.47.

Полученные расчетные значения t-критерия указывают на то, что различия значений соотношения $PM_{2.5}/PM_{10}$ при БМУ и НБМУ статистически не значимы, а при БМУ и НМУ, а также при НБМУ и НМУ статистически значимы.

Усредненная массовая доля $PM_{2.5}$ при БМУ и НБМУ составила 56.8 ± 10.1 %, а при НМУ – 39.9 ± 11.0 %. Данные экспериментальных исследований показали, что при неблагоприятных для рассеивания частиц метеоусловиях (сильном ветре, длительной сухой погоде) доля $PM_{2.5}$ в фракции PM_{10} уменьшается, в среднем, на 17 %.

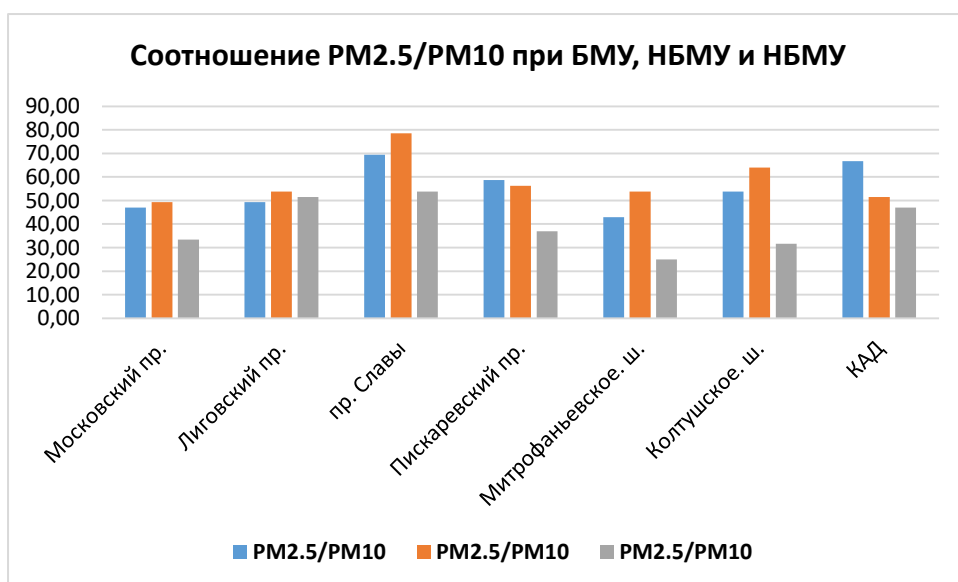


Рисунок 16 - Соотношение $PM_{2.5}/PM_{10}$ при БМУ, НБМУ и НМУ

Содержание $PM_{2.5}$ во фракции PM_{10} в придорожном воздухе автомагистралей, открытых для проезда грузового транспорта, при БМУ и НБМУ достаточно высокое – в пределах от 51.5 % на КАД до 78.5 % на проспекте Славы (за исключением Митрофаньевского шоссе, где доля $PM_{2.5}$ была несколько ниже – 42.8-53.8 %). Среднее значение составило 59.6 ± 10.3 %. Содержание $PM_{2.5}$ во фракции PM_{10} в воздушной среде автодорог, свободных от грузового транспорта (Московского и Лиговского проспектов), при таких же метеорологических условиях, изменялось от 47.1 до 53.8 %, в среднем составив 49.8 ± 2.8 %. Таким образом, было установлено, что при БМУ и НБМУ содержание мелкодисперсного аэрозоля $PM_{2.5}$, поступающего в атмосферный воздух в окрестностях

автомагистралей преимущественно с выбросами отработавших газов автомобилей в виде сажевых частиц, на автомагистралях, где разрешен проезд для грузовых автомобилей, на 16.4 % больше, чем на магистралях без грузового транспорта.

2.6 Выводы по разделу

- Вблизи автодорог с потоками автотранспорта от 2500 до 4500 авт/ч, свободных от проезда грузового транспорта (Московский и Лиговский проспекты) и с долей грузового транспорта до 10 % (проспект Славы, Пискаревский проспект, Митрофаньевское шоссе, Колтушское шоссе), при благоприятных и нормальных благоприятных метеоусловиях концентрации взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ не превышают установленные в РФ ПДК_{СС}, изменяясь в пределах 10-60 мкг/м³ и 5-35 мкг/м³, соответственно. На наиболее загруженных участках КАД Санкт-Петербурга, с высокой интенсивностью движения от 7500 до 12000 авт/ч и высокой долей тяжелого дизельного грузового транспорта (до 25 %), даже при нормальных метеоусловиях наблюдается превышение содержания PM_{10} и $PM_{2.5}$ относительно ПДК_{СС} до 1.5 и 2.5 раз, соответственно.

- Сравнение результатов измерений, полученных на автодорогах с регулируемым движением при НБМУ, со значениями ПДК_{СГ} $PM_{2.5}$ и ПДК_{СГ} PM_{10} , установленными ВОЗ, указывает на то, что ПДК_{СГ} PM_{10} превышено в 1.5-3 раза, а ПДК_{СГ} $PM_{2.5}$ превышено в 1.2-2.6 раз.

- Высокая загрязненность дорожной среды грязевыми отложениями в сочетании с неблагоприятными метеоусловиями (длительной ясной сухой погодой, низкой/умеренной влажностью, умеренным или сильным ветром), приводят к возникновению на автомагистралях города и в их окрестностях опасных высоких концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$, превышающих ПДК_{СС} в 2-4.5 и 1.2-3.5 раза, соответственно. На Лиговском проспекте, проспекте Славы и Пискаревском проспекте ПДК_{СС} $PM_{2.5}$ были превышены в 1.3-1.8 раз, а ПДК_{СС} PM_{10} в 1.2-2.1 раза. На автомагистралях с долей грузового транспорта от 10 % и более –

Митрофаньевском шоссе, Колтушском шоссе и КАД, – ПДК_{СС} РМ_{2.5} было превышено в 2.5-3.3 раза, а ПДК_{СС} РМ₁₀ в 3.3-4.3 раз.

- Независимо от метеорологических условий, на дорогах города периодически отмечаются эпизоды краткосрочного чрезвычайного локального загрязнения воздушной среды ВЧ с многократным превышением ПДК_{МР} (до 20 и более раз). Возникновение таких узко локальных чрезвычайных ситуаций связано с проведением дорожно-строительных и земляных работ, сухой уборкой городских улиц, проездом грузового транспорта с пылящими сыпучими материалами.

- С использованием статистического теста t-критерия было доказано, что различия в значениях соотношения РМ_{2.5}/РМ₁₀ при БМУ и НБМУ статистически не значимы, а при БМУ и НМУ, а также при НБМУ и НМУ статистически значимы. Анализ дисперсионного состава ВЧ показал, что во фракции РМ₁₀ содержание более опасного аэрозоля РМ_{2.5} достаточно высоко и составляет, в среднем, при БМУ и НБМУ 56.8 ± 10.1 %, а при НМУ – 39.9 ± 11.0 %. Наибольший процентное содержание РМ_{2.5} характерно для автомагистралей, разрешенных для проезда грузового транспорта, и составляет 59.6 ± 10.3 %. На автодорогах, свободных от грузового транспорта, содержание РМ_{2.5} составляет 49.8 ± 2.8 %.

3 Оценка взаимосвязи концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ в придорожном воздухе и гидрометеорологических параметров методом корреляционно-регрессионного анализа

В ходе экспериментальных исследований было выявлено влияние гидрометеорологических параметров и интенсивности автотранспортных потоков на содержание ВЧ в воздухе. Для исследования взаимосвязей между концентрацией PM_{10} и $PM_{2.5}$ в придорожном воздухе и другими факторами, а именно, скоростью ветра, влажностью воздуха, температурой окружающей среды и интенсивностью АТП, был использован метод корреляционно-регрессионного анализа. Корреляционную связь можно обнаружить только при массовом сопоставлении данных. Наличие объемного массива результатов измерений концентраций взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ за период 2012-2016 гг. позволило применить этот метод в диссертационном исследовании.

Корреляционно-регрессионный анализ проводился в несколько этапов:

- На основании обработки информации, полученной в ходе экспериментов, были определены основные аргументы.
- Затем были определены параметры тесноты и формы взаимосвязи между несколькими признаками – концентрацией ВЧ в придорожном воздухе, гидрометеорологическими параметрами и интенсивностью движения АТП.
- На следующем этапе были проведены модельные расчеты и анализ полученных результатов.

3.1 Корреляционный анализ

Сначала, на основании данных собственных измерений и результатов измерений мобильной лаборатории Комитета, были рассчитаны среднесуточные концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$, из совокупности которых была выделена генеральная выборка значений. При проведении собственных дорожных исследований на Московском проспекте, Митрофаньевском шоссе, Колтушском шоссе и КАД одновременно с измерением концентраций ВЧ осуществлялась оценка

характеристик АТП и измерение гидрометеорологических параметров (температуры воздуха, относительной влажности и скорости ветра). Эти данные также были использованы при проведении корреляционно-регрессионного анализа. Для Лиговского проспекта, проспекта Славы и Пискаревского проспекта, данные измерений ВЧ в окрестностях которых были получены из Комитета, гидрометеорологические параметры были взяты из архива метеорологических данных, а исследования интенсивности движения АТС на этих магистралях были проведены дополнительно в часы пик. Генеральная выборка экспериментальных данных приведена в таблице 8.

Основными показателями, определяющими характеристики корреляционно-регрессионной зависимости, считаются:

- коэффициенты парной корреляции, указывающие на тесноту взаимосвязи двух факторов;
- коэффициенты множественной корреляции, демонстрирующие взаимосвязь результата и факторов;
- коэффициенты частной детерминации, показывающие, каким образом изменение аргумента влияет на изменение искомого признака;
- коэффициенты множественной детерминации, показывающие удельный вес всех аргументов на вариацию искомого признака.

Относительная погрешность значений среднесуточных концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ не превышала 7% и 9%, соответственно, при доверительном интервале 0.95.

Таблица 8 – Генеральная выборка аргументов для корреляционно-регрессионного анализа.

Месяц	Температура, С	Влажность, %	скорость ветра, м/с	Интенсивность движения, авт/ч	Концентрация РМ ₁₀ , мкг/м ³	Концентрация РМ _{2,5} , мкг/м ³
Параметр	X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	9	94	1.06	2800	2.11	1.77
1	16.25	93	1.60	3000	4.47	2.61
1	13.38	60	2.75	3440	8.40	3.67
1	-8.5	81	2.24	3440	11.32	4.40
2	-9.62	56	2.80	3458	8.41	3.16
2	14.38	86	2.75	3720	9.41	4.57
3	-5.38	89	4.53	3300	7.55	4.17
3	12.25	63	1.62	3420	8.17	4.05
3	12.38	81	4.50	3458	11.83	3.70
4	16	80	1.86	3810	12.96	7.73
4	-7	79	4.00	3878	13.65	4.75
5	10.38	70	3.50	4160	23.91	16.42
5	3.12	40	2.00	4400	60.21	35.23
6	-4.5	74	3.56	4060	16.52	5.12
6	4.75	72	2.77	4070	19.16	11.10
6	7.88	68	2.71	4202	24.73	13.10
6	1.75	64	2.00	4210	25.01	12.28
6	16.5	64	2.43	4215	27.80	11.69
6	-0.88	63	1.60	4215	28.26	10.20
6	19.12	56	1.18	4320	35.65	13.38
7	19.12	48	0.40	4340	40.65	12.94
8	23.3	60	3.00	4300	30.56	18.17
8	10.12	48	1.33	4350	43.95	34.94
8	10.38	47	1.00	4390	57.84	29.53
9	-7	79	2.00	3921	13.69	6.72
9	-5.75	83	2.60	3930	10.42	3.63
9	2.62	78	1.79	3964	14.25	6.20
9	-4.5	78	2.00	3985	14.95	5.82
9	-2.38	77	2.20	4006	15.24	6.30
9	14.12	76	2.53	4007	15.91	8.06
9	4.62	72	4.00	4100	19.69	11.29
9	7.62	72	3.31	4110	22.55	11.63
10	-8	80	2.00	3720	11.95	5.20

Месяц	Температура, С	Влажность, %	скорость ветра, м/с	Интенсивность движения, авт/ч	Концентрация PM_{10} , мкг/м ³	Концентрация $PM_{2.5}$, мкг/м ³
Параметр	X1	X2	X3	X4	X5	X6
10	12	80	1.35	3725	12.58	6.99
10	16	84	2.00	3765	9.88	5.00
10	15.62	82	4.86	3982	10.90	4.23
11	-2.62	48	3.27	3560	8.58	4.20
11	-9	85	3,00	3725	9,50	3,60
11	15.75	83	2.76	3824	10,29	5,22
12	11.38	92	6.94	3200	6.80	3.80
12	14.62	89	3.42	3350	7.61	4.87

В рамках реализации задачи диссертационного исследования был произведен корреляционный анализ. Для выявления качественной корреляционной связи между концентрацией PM_{10} и $PM_{2.5}$ и остальными факторами сначала (методом построения парных диаграмм рассеяния) были проанализированы четыре парные корреляции: между концентрацией ВЧ и интенсивностью движения АТС, концентрацией ВЧ и относительной влажностью воздуха, концентрацией ВЧ и скоростью ветра, концентрацией ВЧ и температурой. Соответствующие диаграммы рассеяния представлены на рисунках 17-20. На рисунках также приведены линии тренда.

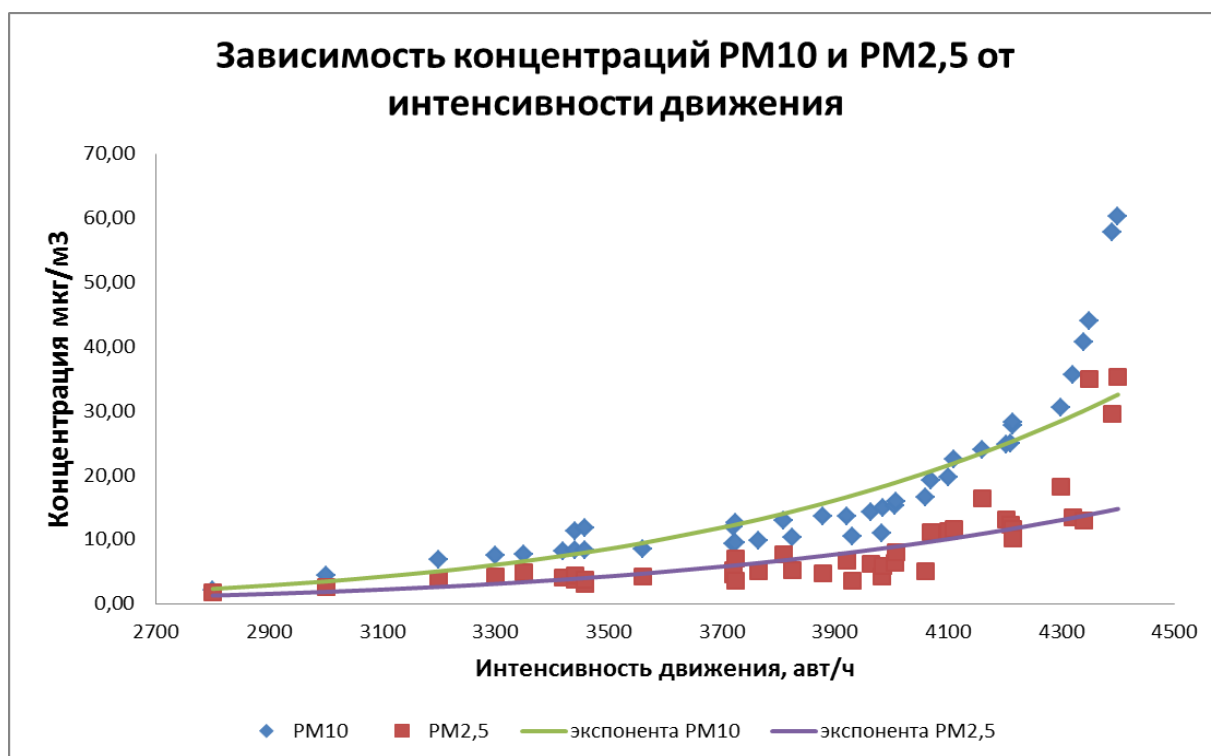


Рисунок 17 – Корреляционная зависимость концентрации PM₁₀ и PM_{2,5} в придорожном воздухе от интенсивности движения

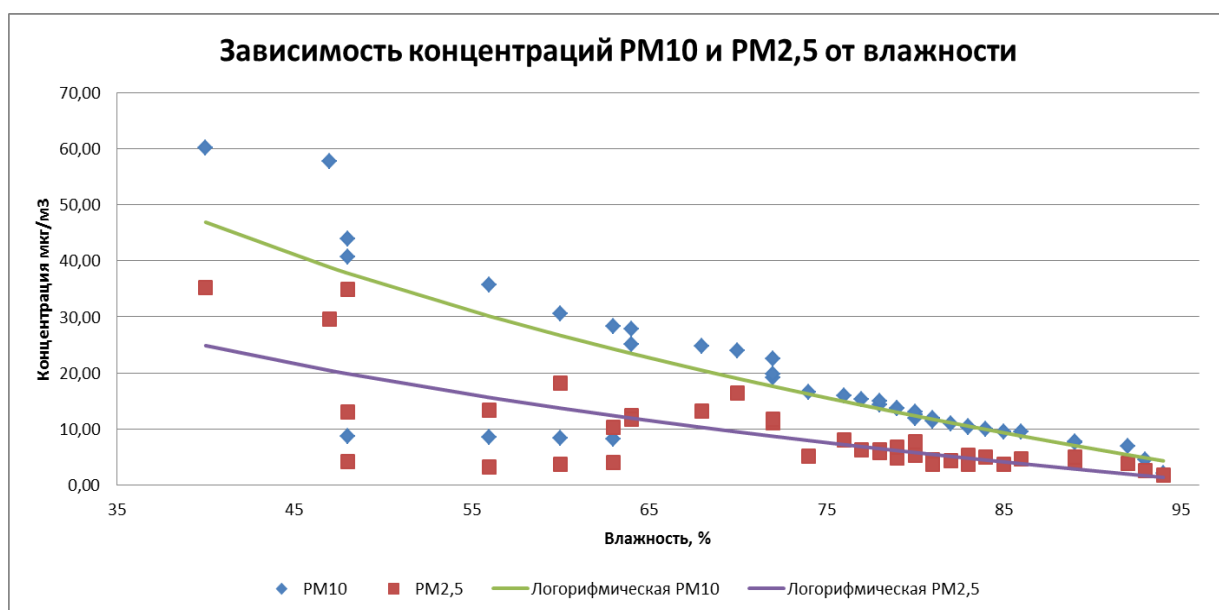


Рисунок 18 – Корреляционная зависимость концентрации PM₁₀ и PM_{2,5} от влажности воздуха

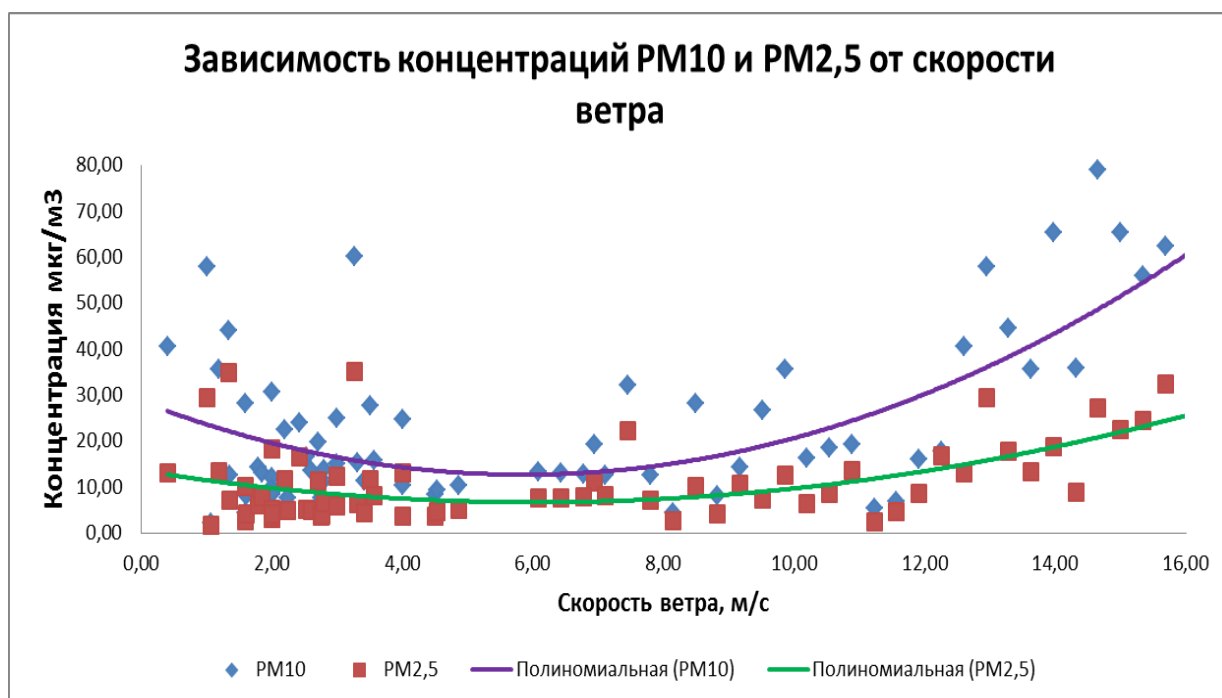


Рисунок 19 – Корреляционная зависимость концентрации PM₁₀ и PM_{2,5} в придорожном воздухе от скорости ветра

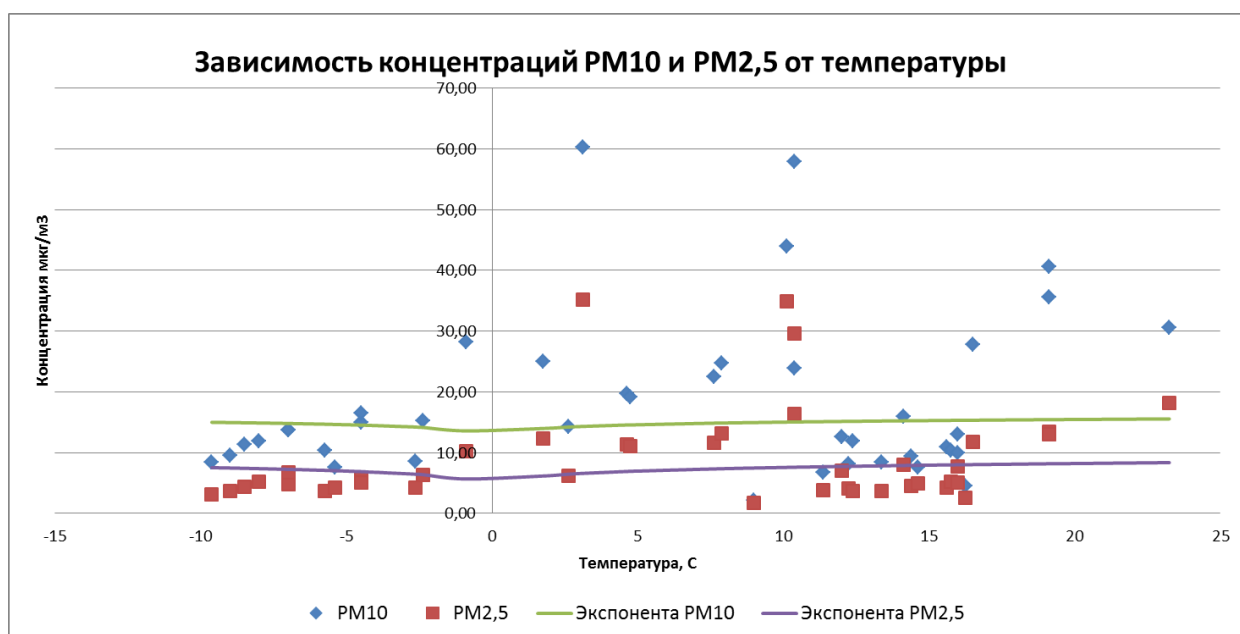


Рисунок 20 – Корреляционная зависимость концентрации PM₁₀ и PM_{2,5} в придорожном воздухе от температуры

При анализе графических зависимостей уже можно обнаружить различие во взаимосвязях значений концентрации ВЧ и остальных факторов. Диаграмма 19 свидетельствует об отсутствии сильной взаимосвязи между концентрацией ВЧ и температурой воздуха. Остальные диаграммы рассеяния характеризуется нелинейной зависимостью.

Для оценки связей между рассматриваемыми параметрами, были рассчитаны коэффициенты корреляции с последующей статистической проверкой. Параметрический коэффициент корреляции Пирсона r является индикатором линейной связи между парными переменными, подчиняющимися нормальному закону распределения. Значение r , близкое к $+1$ или к -1 , свидетельствует о сильной прямой или обратной связи. Значение, близкое к нулю, указывает на отсутствие линейной связи, но не исключает возможности нелинейной связи между переменными. Для анализа были выбраны шесть переменных: X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 , X_6 , где X_1 – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$; X_2 – относительная влажность воздуха, %; X_3 – скорость ветра, м/с; X_4 – интенсивность движения АТП, авт/ч; X_5 – концентрация ВЧ PM_{10} , мкг/м^3 ; X_6 – концентрация ВЧ $\text{PM}_{2.5}$, мкг/м^3 .

При помощи универсального статистического пакета STADIA были рассчитаны диагональные матрицы коэффициентов корреляции Пирсона между выбранными параметрами. Матрицы корреляционных коэффициентов для PM_{10} и $\text{PM}_{2.5}$ представлены в таблицах 9 и 10, соответственно.

Таблица 9 – Матрица значений коэффициентов корреляции Пирсона для PM_{10} .

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
X_1	1				
X_2	- 0.08285	1			
X_3	- 0.09786	0.3691	1		
X_4	0.08695	- 0.6199	- 0.2566	1	
X_5	0.193	- 0.7748	- 0.3746	0.7842	1

Критическое значение коэффициента Пирсона (r_0) для уровня значимости $P=0.05$ и числа степеней свободы $f = 40$ составляет 0.3046. Значения,

представленные в матрице и имеющее численное выражение меньше критического, являются недостоверными, т.е. связи между данными параметрами в данной матрице не наблюдается, из чего следует что, число значимых коэффициентов в приведенной матрице равно 5 и составляет 50% от общего числа коэффициентов.

Таблица 10 – Матрица значений коэффициентов корреляции Пирсона для $PM_{2.5}$.

	X1	X2	X3	X4	X6
X1	1				
X2	- 0.08285	1			
X3	- 0.09786	0.3691	1		
X4	0.08695	- 0.6199	- 0.2566	1	
X6	0.2061	- 0.7082	- 0.3041	0.6884	1

Критическое значение $r_0=0.3046$. По аналогии, значения, имеющее численное выражение меньше критического, являются недостоверными, т.е. связи между данными параметрами в данной матрице не наблюдается. Таким образом, число значимых коэффициентов равно 4 и составляет 40% от общего числа коэффициентов.

В результате анализа параметрических матриц для PM_{10} и $PM_{2.5}$ было установлено, что наиболее сильная взаимосвязь наблюдалась между концентрациями PM_{10} и $PM_{2.5}$ и интенсивностью движения АТП, значения r составили 0.7842 и 0.6884, соответственно, и между концентрациями PM_{10} и $PM_{2.5}$ и относительной влажностью воздуха, значения r составили (-0.7748) и (-0.7082), соответственно.

Влияние ветровой нагрузки, как показали проведенные нами исследования, на рассеивание и оседание мелкодисперсных ВЧ в окрестностях автомобильных дорог не столь однозначно. С одной стороны, было подтверждено, что при высокой скорости ветра (> 15 м/с) в условиях длительной сухой погоды в местах проведения дорожного строительства или весной при наличии больших количеств грязевых отложений, на автомагистралях и в их окрестностях формируются пылевые поземки, приводящие к высоким концентрациям PM_{10} и $PM_{2.5}$. С другой

стороны, высокие концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ также наблюдаются при штилевой погоде и в значительной степени коррелируют с концентрациями NO_x , что свидетельствует о вторичном процессе формирования мелкодисперсных аэрозолей в условиях высокого загрязнения атмосферы газообразными поллютантами. Наиболее благоприятной для осаждения частиц является слабая и умеренная ветровая нагрузка.

3.2 Регрессионный анализ

В практике обработки экспериментально полученных данных весьма часто возникает необходимость определить не только корреляционное соотношение между изучаемыми характеристиками, но и установить определенную обусловленность между ними, представив выявленную связь в виде аппроксимированной математической зависимости.

Задачей регрессионного анализа является на основе экспериментальных данных найти наиболее адекватное математическое выражение, позволяющее выразить зависимую переменную в виде математической функции от независимых переменных и построить таким образом регрессионную модель. Метод регрессионного анализа позволяет:

- 1) производить расчет различного вида регрессионных моделей с определением значений параметров модели (коэффициентов при независимых переменных);
- 2) проверить гипотезу адекватности модели имеющимся наблюдениям;
- 3) использовать модель для предсказания или прогнозирования значений зависимой переменной при новых значениях независимых переменных.

Среди регрессионных моделей обычно выделяют однопараметрические модели (от одной переменной) и многопараметрические модели (от нескольких переменных), а также линейные модели относительно независимых переменных, нелинейные по переменным и нелинейные по параметрам. Наиболее простыми для построения и анализа являются однопараметрические и

многопараметрические линейные модели, которые содержат независимые переменные только в первой степени. Более сложные модели могут включать различные нелинейные функции, как от независимых переменных, так и от параметров. Наконец, пошаговая регрессия позволяет из множества независимых переменных отобрать только те, которые достаточны для адекватного описания многопараметрической зависимости.

Рассматриваемые в настоящей главе методы являются параметрическими, т. е. основанными на предположении о нормальном распределении ошибок наблюдений.

В работе был использован метод простой регрессии. Процедура простой регрессии предоставляет возможность строить наиболее употребительные регрессионные модели для экспериментальных зависимостей от одной переменной, а также для временных рядов.

В ходе анализа можно получить следующие результаты:

- выбрать из нескольких математических моделей ту, которая с большей точностью описывает экспериментальную зависимость;
- вычислить интерполяционные значения;
- построить прогноз на будущее на основе выбранной модели с 95%-ным доверительным интервалом;
- провести анализ регрессионных остатков.

В регрессионном анализе прогнозируемая переменная (функция) обозначается как Y , а другая переменная – т.е. аргумент или фактор, – обозначается как X . В данной работе прогнозируемые переменные – это концентрации PM_{10} или $PM_{2.5}$.

Для построения регрессионной модели был использован программный продукт – универсальный статистический пакет STADIA.

Работа с программой осуществляется в следующей последовательности:

- 1) Из электронной таблицы выбираются для анализа две парные переменные X и Y .

2) Затем выбирается наиболее адекватная регрессионная модель. Выбор математической функции определяется характером экспериментальной зависимости, поэтому сначала строятся графические представления (рис. 17-20) и визуально подбираются математические функции, которые в наибольшей степени отражают характер зависимостей (рис. 17-20). Программа Stadia формирует результаты расчетов в виде таблиц – таблицы 11-15.

Таблица 11 – Параметры простой регрессионной зависимости концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ от температуры воздуха.

ПРОСТАЯ РЕГРЕССИЯ			
Y=X5 – Концентрация PM ₁₀		X=X1 – Температура	
Модель: степенная Y = EXP(A0)*X ^{A1}			
Коэффициенты	A0	A1	
Значение	2.614	0.0414	
Множество R	R ²	F	Значимость
0,64389	0.41459	27.62	2.79*10 ⁻¹⁰
Гипотеза	Регрессионная модель адекватна экспериментальным данным		

ПРОСТАЯ РЕГРЕССИЯ			
Y=X6 – Концентрация PM _{2.5}		X=X1 – Температура	
Модель: степенная Y = EXP(A0)*X ^{A1}			
Коэффициенты	A0	A1	
Значение	1.75	0.1187	
Множество R	R ²	F	Значимость
0,62123	0.38593	24.51	4.75*10 ⁻¹⁰
Гипотеза	Регрессионная модель адекватна экспериментальным данным		

Примечания: R – множественный коэффициент корреляции между зависимой переменной и независимыми переменными; R^2 – коэффициент детерминации; F – критерий Фишера; «Значимость» – уровень значимости нулевой гипотезы.

Таблица 12 – Параметры простой регрессионной зависимости концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ от относительной влажности воздуха.

ПРОСТАЯ РЕГРЕССИЯ			
Y=X5 – Концентрация PM ₁₀		X=X2 – Относительная влажность воздуха	
Модель: логарифмическая Y = A0+A1*LN(X)			
Коэффициенты	A0	A1	
Значение	231	-49.9	
Множество R	R ²	F	Значимость
0.79144	0.62638	65.38	2.26*10 ⁻¹¹
Гипотеза	Регрессионная модель адекватна экспериментальным данным		

ПРОСТАЯ РЕГРЕССИЯ			
Y=X6 – Концентрация PM _{2.5}		X=X2 – Относительная влажность воздуха	
Модель: логарифмическая Y = A0+A1*LN(X)			
Коэффициенты	A0	A1	
Значение	126.5	-27.55	
Множество R	R ²	F	Значимость
0.73276	0.53693	45.225	5.19*10 ⁻¹¹
Гипотеза	Регрессионная модель адекватна экспериментальным данным		

Примечания: R – множественный коэффициент корреляции между зависимой переменной и независимыми переменными; R^2 – коэффициент детерминации; F – критерий Фишера; «Значимость» – уровень значимости нулевой гипотезы.

Таблица 13 – Параметры простой регрессионной зависимости концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ от скорости ветра.

ПРОСТАЯ РЕГРЕССИЯ			
Y=X5 – Концентрация PM ₁₀		X=X3 – Скорость ветра	
Модель: логарифмическая Y = A0+A1*LN(X)			
Коэффициенты	A0	A1	
Значение	27.95	-11.47	
Множество R	R ²	F	Значимость
0.43817	0.19199	9.267	2.77*10 ⁻⁷
Гипотеза	Регрессионная модель адекватна экспериментальным данным		

ПРОСТАЯ РЕГРЕССИЯ			
Y=X6 – Концентрация PM _{2.5}		X=X3 – Скорость ветра	
Модель: логарифмическая Y = A0+A1*LN(X)			
Коэффициенты	A0	A1	
Значение	13.3	-5.004	
Множество R	R ²	F	Значимость
0.3205	0.10272	4.465	1.92*10 ⁻⁴
Гипотеза	Регрессионная модель адекватна экспериментальным данным		

Примечания: R – множественный коэффициент корреляции между зависимой переменной и независимыми переменными; R^2 – коэффициент детерминации; F – критерий Фишера; «Значимость» – уровень значимости нулевой гипотезы.

Таблица 14 – Параметры простой регрессионной зависимости концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ от интенсивности движения АТП.

ПРОСТАЯ РЕГРЕССИЯ			
Y=X5 – Концентрация PM ₁₀		X=X4 – Интенсивность движения АТС	
Модель: степенная Y = EXP(A0)*X ^{A1}			
Коэффициенты	A0	A1	
Значение	-45.46	5.834	
Множество R	R ²	F	Значимость
0,77426	0.59947	58.37	2.83*10 ⁻¹¹
Гипотеза	Регрессионная модель адекватна экспериментальным данным		

ПРОСТАЯ РЕГРЕССИЯ			
Y=X6 – Концентрация PM _{2.5}		X=X4 – Интенсивность движения АТС	
Модель: степенная Y = EXP(A0)*X ^{A1}			
Коэффициенты	A0	A1	
Значение	-42.66	5.406	
Множество R	R ²	F	Значимость
0.5614	0.31517	17.95	2.44*10 ⁻⁹
Гипотеза	Регрессионная модель адекватна экспериментальным данным		

Примечания: R – множественный коэффициент корреляции между зависимой переменной и независимыми переменными; R^2 – коэффициент детерминации; F – критерий Фишера; «Значимость» – уровень значимости нулевой гипотезы.

С целью повышения достоверности получаемых прогнозов был проведен многопараметрический регрессионный анализ на основе множественной линейной регрессии с использованием всех имеющихся данных – таблица 14.

Таблица 15 – Параметры множественной линейной регрессии.

МНОЖЕСТВЕННАЯ ЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИЯ					
Y=X5 – Концентрация PM ₁₀			X=X1, X2, X3, X4		
Модель: степенная Y = A0+A1*X1+A2*X2+A3*X3+A4*X4					
Коэффициенты	A0	A1	A2	A3	A4
Значение	-13.17	0.1497	-0.4185	-0.8554	0.01638
Множество R	R ²		F		Значимость
0.87645	0.76816		29.82		2.46*10 ⁻⁷
Гипотеза	Регрессионная модель адекватна экспериментальным данным				
МНОЖЕСТВЕННАЯ ЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИЯ					
Y=X6 – Концентрация PM _{2,5}			X=X1, X2, X3, X4		
Модель: степенная Y = A0+A1*X1+A2*X2+A3*X3+A4*X4					
Коэффициенты	A0	A1	A2	A3	A4
Значение	-3.676	0.1105	-0.2524	-0.1706	0.007998
Множество R	R ²		F		Значимость
0.78805	0.62102		14.75		7.51*10 ⁻⁶
Гипотеза	Регрессионная модель адекватна экспериментальным данным				

На основании обработки экспериментальных данных методом множественной линейной регрессии были получены зависимости концентрации PM₁₀ и PM_{2.5} от интенсивности движения АТП и гидрометеорологических параметров: скорости ветра, относительной влажности воздуха и температуры окружающей среды:

$$C_{PM10} = 13.2 - 0.4q + 0.8V + 0.016N \quad (4)$$

$$C_{PM2.5} = 3.7 - 0.2q + 0.2V + 0.008N \quad (5)$$

где:

q – относительная влажность воздуха, %;

V – скорость ветра, м/с;

N – интенсивность движения АТП, авт/ч.

С использованием выведенной регрессионной зависимости и данных архива гидрометеорологических наблюдений было осуществлено прогнозирование концентраций взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ на 2015 г.

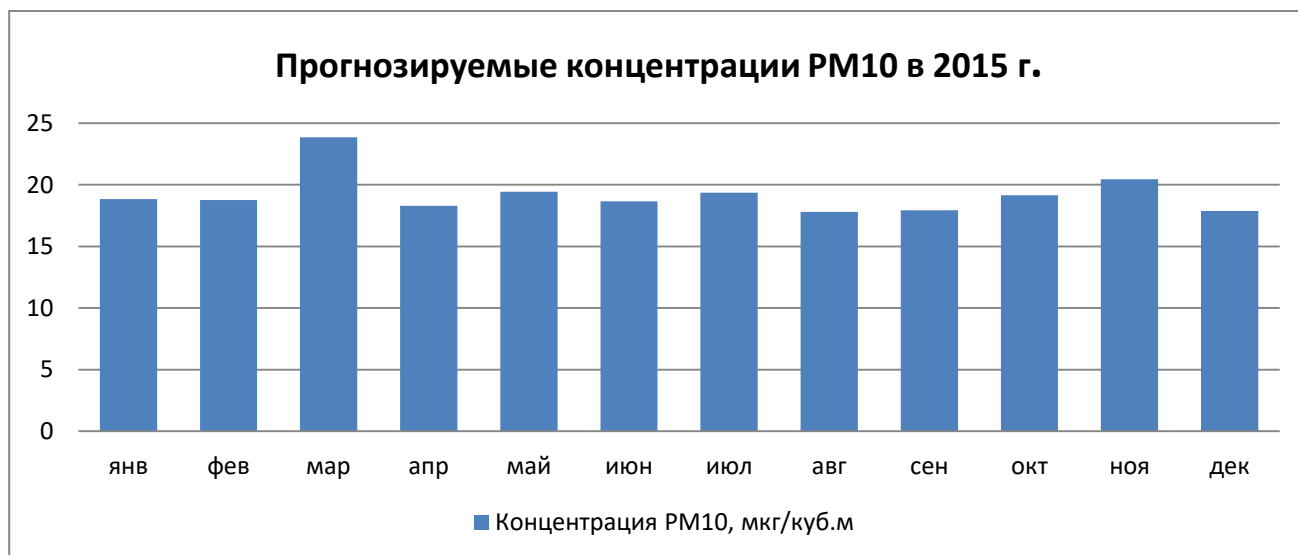


Рисунок 21 – Прогнозные значения концентраций PM_{10} в атмосферном воздухе Санкт-Петербурга на 2015 год, полученные с помощью корреляционно-регрессионной модели

Результаты модельного прогнозирования указывают на тенденцию повышения концентрации в марте месяце, которая была подтверждена данными собственных исследований, а также результатами измерений, полученными на станциях мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга. Однако, расчетные концентрации оказались ниже реально наблюдавшихся в марте.

В связи с выше сказанным, в дальнейшем, для количественной оценки и прогнозирования загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$, впервые в РФ была разработана инженерная методика и компьютерная программа, позволяющая рассчитывать выбросы PM_{10} и $PM_{2.5}$ от автотранспортных потоков.

3.3 Выводы по разделу

В результате корреляционно-регрессионного анализа было установлено, что наиболее сильная взаимосвязь наблюдалась между концентрациями PM_{10} и $PM_{2.5}$ и интенсивностью движения автотранспортных потоков, значения r составили 0.7842 и 0.6884, соответственно, и между концентрациями PM_{10} и $PM_{2.5}$ и относительной влажностью воздуха, значения r составили (-0.7748) и (-0.7082), корреляционная связь между концентрациями PM_{10} и $PM_{2.5}$ и температурой воздуха не наблюдалась.

Влияние ветровой нагрузки на рассеивание и оседание мелкодисперсных ВЧ в окрестностях автомобильных дорог неоднозначно. С одной стороны, было подтверждено, что при высокой скорости ветра (> 15 м/с) в условиях длительной сухой погоды при высоком загрязнении автодорог грязевыми отложениями формируются пылевые поземки, приводящие к высоким концентрациям PM_{10} и $PM_{2.5}$. С другой стороны, высокие концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ также наблюдаются при штилевой погоде и в значительной степени коррелируют с концентрациями NO_x и углеводородных загрязнителей, что свидетельствует о вторичном процессе формирования мелкодисперсных аэрозолей в условиях высокого загрязнения атмосферы газообразными поллютантами. Вопрос вторичного образования ультрадисперсных взвешенных частиц из газообразных поллютантов в результате физико-химических превращений, протекающих в атмосфере, требует дальнейших исследований. Наиболее благоприятной для оседания частиц является слабая и умеренная ветровая нагрузка.

4 Расчетная методика для прогнозирования и мониторинга экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$ с оценкой вклада разных источников

В Российской Федерации методики, предназначенные для оценки и прогнозирования выбросов автотранспорта и загрязнения ими воздушной среды, разрабатываются, в основном, двумя организациями – московским научно-исследовательским институтом автомобильного транспорта (НИИАТ) и [150-153]. Как было отмечено в п. 1.3.3, в Российской Федерации на настоящий момент не существует методических подходов, позволяющих в полном объеме количественно оценивать и прогнозировать загрязнение воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$, генерируемыми при транспортном процессе, все вышеупомянутые методики позволяют рассчитывать выбросы только сажевых частиц, выделяющихся с отработавшими газами двигателей автомобилей, но не учитывают ВЧ, поступающие в результате износа тормозных колодок, покрышек шин, дорожного полотна, наносных пылевидных частиц и частиц, поступающих в воздушную среду под действием турбулентных потоков воздуха, возникающих при движении ТС, поэтому для решения основной задачи диссертационного исследования потребовалось разработать соответствующую методику и компьютерную программу.

За основу была взята «Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов» (СПб, 2010) [151], поскольку именно эта методика позволяет, на основании данных обследования структуры потоков и интенсивности движения, производить оценку выбросов опасных загрязнителей (NO_x , Pb, ЛОС, сажевых частиц, CO, формальдегида, SO_2 , бенз- α -пирена) непосредственно вблизи автодорог. Несомненным преимуществом этой методики является то, что обследование автотранспортных потоков производится с оценкой легко идентифицируемых пяти категорий автотранспортных средств: легковых автомобилей, легкого коммерческого

транспорта (до 3.5 т), грузовых автомобилей от 3.5 до 12 т, грузовых автомобилей > 12 т и автобусов > 3.5 т, – для выполнения которого не требуется предварительная подготовка специалистов.

Рассматривая транспортный процесс с точки зрения выброса ВЧ, можно выделить два принципиальных источника: единичное транспортное средство – источник выброса сажевых частиц и частиц, выделяющихся в результате износа шин, истирания тормозных колодок, истирания дорожного полотна, – и дорожную среду, включающую совокупность наносных частиц и вторичной взвеси, генерируемой движущимся транспортом (рисунок 22). Следует отметить, что в зарубежных методических подходах [164-169] принято условно обозначать сажевые частицы, выделяющиеся с ОГ, как «*exhaust PM*», в дословном переводе – «выхлопные ВЧ», а частицы, образующиеся в результате износа шин, истирания тормозных колодок, истирания дорожного полотна, – «*non-exhaust PM*», соответственно, «невыхлопные ВЧ». В РФ стандартным является термин «отработавшие газы», однако, в рамках своей работы, с целью единообразия и однозначной трактовки терминов, я использовал выше отмеченную зарубежную условную терминологию.

Основные источники взвешенных частиц на дорогах



Рисунок 22 – Основные источники взвешенных частиц на дорогах

Ключевым параметром любой расчетной методики, предназначенной для оценки выбросов загрязняющих веществ автотранспортными средствами, является определение значений факторов эмиссии – усредненных удельных пробеговых выбросов загрязняющих веществ ($[г/км]$ и/или $[г/с]$) для условно выделенных категорий АТС. Для определения факторов эмиссии «невыхлопных ВЧ» в мировой практике используются два подхода [168]:

- прямое измерение в условиях лабораторно-стендовых или полевых испытаний;
- косвенное – расчет вклада от известных источников в суммарную концентрацию и определение искомого с использованием подхода материального баланса.

При разработке расчетной методики мною были использованы оба этих подхода. Концептуальная схема расчетной методики и программы представлены на рисунке 23.

Для пяти категорий автотранспортных средств: легковых автомобилей, легкого коммерческого транспорта (до 3.5 т), грузовых автомобилей от 3.5 до 12 т, грузовых автомобилей > 12 т, автобусов > 3.5 т, – были определены факторы эмиссии «выхлопных» сажевых частиц и факторы эмиссии «невыхлопных» частиц, рассчитанные на основании нормативных данных по ресурсу тормозных фрикционных материалов, сроков замены автомобильных шин и ремонта дорожного полотна от образовавшейся колеиности. Затем с использованием полученных значений удельных пробеговых выбросов и с учетом структуры и интенсивности транспортных потоков на магистрали определяется суммарный выброс от автотранспортного потока на конкретном участке улично-дорожной сети. Далее с использованием методического подхода, предложенного в общесоюзном нормативном документе «ОНД-86» [159] производится расчет приземной концентрации ВЧ, которая формируется за счет выбросов от автотранспортных потоков. Оценка вклада наносных частиц и вторичной взвеси в суммарную концентрацию проводится путем вычитания расчетной приземной

концентрации ВЧ из измеренной. Подробное описание методики представлено в разделах 4.1-4.4.

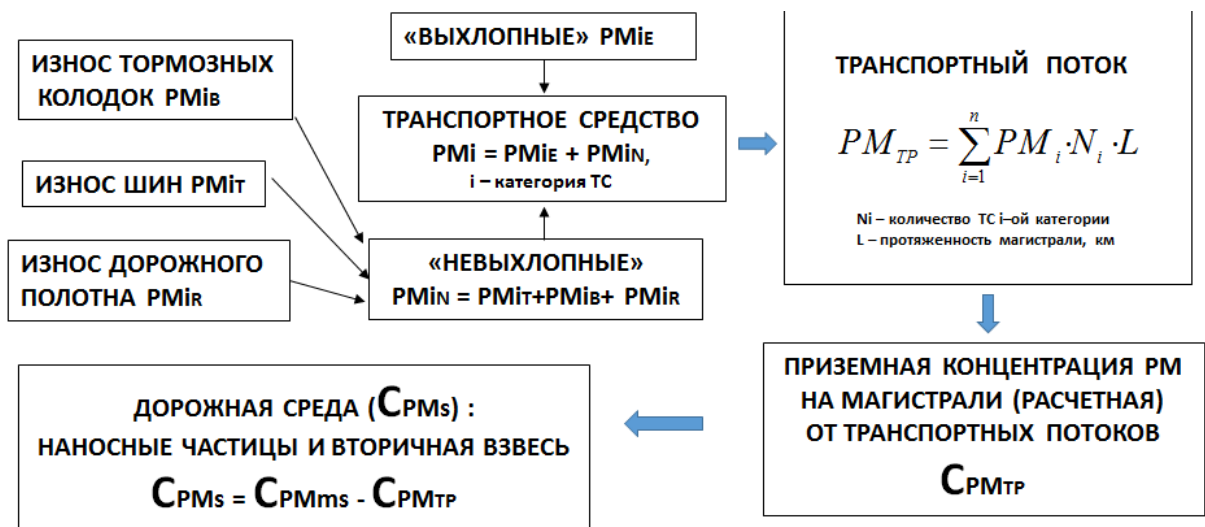


Рисунок 23 – Концептуальная схема расчетной методики, реализованной в Excel, для оценки и прогнозирования экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях ВЧ

Примечания: PM_i – суммарный выброс ВЧ транспортным средством i -ой категории; PM_{IE} – выброс «выхлопных» ВЧ транспортным средством i -ой категории; PM_{IN} – суммарный выброс «невыхлопных» ВЧ транспортным средством i -ой категории, включающий выбросы за счет износа шин PM_{IT} , износа тормозных колодок PM_{IB} , износа дорожного полотна PM_{IR} ; PM_{TP} – суммарный выброс ВЧ от автотранспортного потока; N_i – число автомобилей i -ой категории в автотранспортном потоке; C_{PMTP} – приземная концентрация ВЧ на автомагистрали, формируемая за счет «выхлопных» и «невыхлопных» выбросов от автотранспортных потоков; C_{PMms} – экспериментально измеренная концентрация взвешенных частиц на автодороге; C_{PMs} – концентрация ВЧ, формируемая за счет наносных частиц и вторичной взвеси, генерируемой движущимся автотранспортом.

4.1 Определение факторов эмиссии взвешенных частиц, поступающих в результате износа тормозных колодок

На автомобилях используются два основных вида тормозных устройств: тормозные диски и тормозные барабаны. Передние колеса большинства легковых автомобилей и легкого коммерческого транспорта оснащены дисковыми тормозами, а задние – барабанными. Токсическая опасность ВЧ, поступающих в воздушную среду в результате истирания тормозных колодок,

определяется химическим составом фрикционных пластин, дисков и барабанов. Состав фрикционной пластины является, как правило, коммерческой тайной предприятия-изготовителя. Тем не менее, можно выделить некоторые общие компоненты. В состав фрикционных накладок входят органические и минеральные волокна (до недавнего времени широко использовался асбест), керамика, полимерные смолы, синтетический каучук, наполнители и модификаторы трения. В соответствии с ГОСТом Р 50507-93 «Изделия фрикционные тормозные. Общие технические требования» [170], состав фрикционных накладок включает 40 % бутадиенового каучука, 30 % асбеста, 30 % порошковой меди. В соответствии с паспортом безопасности к ТУ 2571-002-89376181-2000 «Накладки тормозные автомобилей "ВАЗ", "ГАЗ", "ЗИЛ"», в состав фрикционного материала входят 34 % асбеста, 19 % каучука СКБ, 4 % ускорителей (серы, каптакса, тиурама), 26 % барита, 6 % глинозема, 1 % металлической стружки, 4 % графита, 5 % модификатора, 1 % масла ПН-6. До недавнего времени в качестве основного компонента фрикционных накладок использовался крайне токсичный материал – асбест, поэтому и сейчас большинство старых автомобилей (более 10 лет) оборудованы тормозными системами с асбестовыми фрикционными накладками. Асбестовая пыль относится к канцерогенным веществам первого класса опасности, в связи с этим, во Франции его использование запрещено с 1 января 1997 года, а в Европейском Союзе – с 2005 г. В России же разрешено использование около 3000 видов продукции, содержащей хризотилловый асбест. В современных, так называемых органических колодках, соответствующих международному стандарту ECE-R90, в качестве наполнителя используется графит и бариты, в качестве связующего компонента – фенол-формальдегидные смолы, в качестве модификаторов трения – порошкообразная медь.

Износ тормозной системы во многом зависит от таких факторов, как:

а) резкость торможения, т.е., на какой скорости начинается торможение и с какой скоростью происходит замедление автомобиля, – это самый важный фактор;

б) стиль вождения (агрессивное вождение, сопровождающееся частыми и резкими разгонами и торможениями, также сильно влияет на износ тормозов);

в) дорожной средой и погодными условиями (тормозной путь автомобиля будет более длинным при наличии колеи на автодороге, а также в условиях мокрого или обледенелого дорожного полотна);

г) типа автодороги (на городских автодорогах со множеством перекрестков, оборудованных светофорами, пешеходными переходами и т.д., обуславливающими совершение принудительных замедлений и остановок, водители вынуждены прибегать к торможению гораздо чаще, чем на пригородных трассах или скоростных автодорогах. Собственно говоря, наибольшее количество продуктов износа тормозных колодок, как раз и определяется вблизи оживленных перекрестков, светофоров, пешеходных переходов и углов.

Для определения факторов эмиссии «невыхлопных» частиц за счет износа тормозных колодок (PM_{IV}) мною были изучены иностранные источники [164-169] и отечественные нормативные документы [170]. Масса тормозных накладок определялась, как усредненное значение массы фрикционных изделий популярных производителей для пяти выше перечисленных категорий автомобилей. Далее, исходя из предположения, что тормозные колодки требуют своей замены при 90%-ном износе, который, в среднем, наступает через 40000-60000 км пробега, рассчитывался удельный пробеговый выброс пылевидных частиц фрикционных прокладок, поступающих в окружающую среду от одного условного автомобиля i -ой категории, г/км. Также я учитывал, что не все продукты износа тормозов попадают в воздух. По оценкам зарубежных исследователей [166], только около 50% образовавшихся частиц попадают в воздушную среду (из которых 80% выделяется в виде PM_{10}), – остальные осаждаются на поверхности дороги или транспортного средства. Доля $PM_{2.5}$ во

фракции PM_{10} составляет около 60 % [167]. Опираясь на выше описанные гипотезы и предположения, были рассчитаны факторы эмиссии «невыхлопных» частиц за счет износа тормозных колодок (PM_{iB}) для пяти категорий транспортных средств, которые представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Исходные данные для определения факторов эмиссии взвешенных частиц в результате истирания тормозных колодок [PM_{iBW}], г/км.

Категория АТС	M_B , г	M_{BW} , г	N	ΣM_{BW} , г	L, км	TSP_{BW} , г/км	TSP_{ABW} , г/км	PM_{10BW} , г/км	$PM_{2.5BW}$, г/км
Легковые	150	135	4	540	40000	0.014	0.007	0.0056	0.0034
ЛКТ < 3.5	300	270	4	1080	55000	0.020	0.01	0.008	0.0048
Грузовые 3.5 – 12 т	450	405	6	2430	60000	0.041	0.02	0.016	0.0096
Грузовые > 12 т	480	432	8	3456	60000	0.058	0.029	0.0232	0.0139
Автобусы > 3.5 т	400	360	6	2160	60000	0.036	0.018	0.0144	0.0086

Примечания: M_B – усредненная масса одной тормозной накладки, г; M_{BW} – масса фрикционного материала, попадающего в окружающую среду при 90%-ном износе одной тормозной колодки, г; N – число тормозных колодок у АТС; ΣM_{BW} – масса фрикционного материала, попадающего в окружающую среду при 90%-ном износе всех тормозных колодок АТС, г; L – средний пробег автомобиля до замены тормозных колодок, км; TSP_{BW} – суммарный удельный пробеговый выброс частиц в результате износа тормозных колодок, г/км; TSP_{ABW} – суммарный удельный пробеговый выброс частиц в результате износа тормозных колодок, попадающих в атмосферный воздух, г/км; PM_{10BW} – фактор эмиссии PM_{10} за счет истирания тормозных колодок, г/км; $PM_{2.5BW}$ – фактор эмиссии $PM_{2.5}$ за счет истирания тормозных колодок, г/км.

Вклад ВЧ, поступающих в атмосферный воздух дорожной среды в результате износа тормозных систем, в суммарном выбросе «невыхлопных» частиц составляет от 16 до 55 % на городских автодорогах и около 3 % на скоростных автомагистралях [166]. По химическому составу во фракции частиц PM_{10} , эмитируемых в результате истирания тормозов, идентифицируются металлы (Fe, Cu, Zn, Sn, Sb) и сера, а во фракции частиц $PM_{2.5}$ – органические вещества и элементный углерод.

4.2 Определение факторов эмиссии взвешенных частиц, поступающих в результате износа покрышек автомобильных шин

Частицы, образующиеся в результате механического трения покрышек шин о дорожное полотно представлены в большинстве грубодисперсной фракцией, мелкодисперсные же частицы образуются в результате термохимического процесса, когда при механическом трении на поверхности покрышек возникают локальные участки перегрева, приводящие к испарению летучих веществ, содержащихся в покрышках, последующая конденсация которых приводит к образованию ультрадисперсных частиц. Износ покрышек, также, как и износ тормозных систем и дорожного полотна, обуславливается такими вышеупомянутыми факторами, как: стиль управления ТС, качеством дорожного полотна, типом автодороги. Особую опасность представляют шипованные покрышки, используемые в северных регионах в зимний период, в т.ч., и в Санкт-Петербурге. Химические составы покрышек разных производителей очень близки. Их основным компонентом является резиновая смесь (таблица 17) [171].

Таблица 17 – Состав покрышек легковых и грузовых автомобилей [171].

Материал	Содержание в покрышках, %	
	Легковые автомобили	Грузовые автомобили
Резина/эластомеры	47	45
Технический углерод	21.5	22
Металлы	16.5	25
Текстиль	5.5	-
Оксид цинка	1	2
Сера	1	1
Присадки	7.5	5

Примечание: в некоторых типах шин часть технического углерода может быть заменена на диоксид кремния.

В мелкодисперсной фракции PM_{10} обнаруживаются значительные количества цинка, меди и серы, а также полициклические ароматические углеводороды, каучук, алканы.

Исходные данные для определения факторов эмиссии взвешенных частиц в результате истирания покрышек шин $[PM_{IT}]$, г/км, приведены в таблицах 18 (а) и 18 (б).

Таблица 18 (а) – Исходные данные для определения факторов эмиссии взвешенных частиц в результате истирания покрышек шин.

Категория АТС	Маркировка	Внешний диаметр новой покрышки, м	Внешний диаметр изношенной покрышки, м	Ширина, м	Длина окружности новой шины АТС, м	Длина окружности изношенной шины АТС, м	Разница длин, м	Объем материала изношенной покрышки АТС, м ³	Масса, г (при плотности 930 кг/м ³)	пробег, км	Удельный выброс 1 колеса, г/км	усредненный удельный выброс 1 колеса, г/км
Легковые	155/70R13 высота прот-ра 6 мм	0.547	0.539	0.155	1.718	1.693	0.024	0.004	3.53	50000	0.071	0.077
Легковые	185/70R14 высота прот-ра 6 мм	0.615	0.607	0.185	1.931	1.907	0.024	0.005	4.21	50000	0.084	
ЛКТ < 3.5	195/70R15 высота прот-ра 10 мм	0.654	0.641	0.195	2.054	2.011	0.042	0.008	7.63	60000	0.127	0.130
ЛКТ < 3.5	205/70R16 высота прот-ра 10 мм	0.693	0.680	0.205	2.176	2.134	0.042	0.009	8.02	60000	0.134	
Грузовые 3.5 – 12 т	235/65R17 высота прот-ра 12 мм	0.737	0.721	0.235	2.314	2.265	0.050	0.012	10.84	75000	0.145	0.151
Грузовые 3.5 – 12 т	255/55R18 высота прот-ра 12 мм	0.738	0.722	0.255	2.317	2.268	0.050	0.013	11.76	75000	0.157	
Грузовые > 12 т	305/70R22,5 высота прот-ра 15 мм	0.986	0.966	0.305	3.096	3.034	0.062	0.019	17.64	90000	0.196	0.196
Автобусы > 3.5 т	265/70R20 высота прот-ра 15 мм	0.879	0.863	0.265	2.760	2.710	0.050	0.013	12.23	80000	0.153	0.153

Фактор эмиссии «невыхлопных» частиц, эмитируемых за счет износа шин, рассчитывался следующим образом:

- Сначала были проанализированы геометрические размеры наиболее часто используемых марок шин пяти категорий АТС (таблица 17 (а)).

- Принимая во внимание, что покрышки подлежат замене, если протектор стерт не более, чем на 2/3 при среднем пробеге 50000 км для легковых автомобилей и 90000 км для грузовых (таблица 17 (а)), с учетом плотности материала ($\approx 930 \text{ кг/м}^3$), находим массу изношенного материала, выделившегося в окружающую среду.

- Затем, учитывая, что по оценкам зарубежных специалистов [166] только около 1.5 % частиц, поступающих в окружающую дорожную среду при истирании покрышек, имеют аэродинамический диаметр менее 10 мкм, рассчитываем фактор эмиссии. Доля $\text{PM}_{2.5}$ во фракции PM_{10} составляет не более 5 % [167]. (таблица 17 (б)).

Таблица 18 (б) – Исходные данные для определения факторов эмиссии взвешенных частиц в результате истирания покрышек шин.

Категории АТС	TSP_T , г/км	N	$\sum \text{TSP}_T$, г/км	PM_{10T} , г/км	$\text{PM}_{2.5T}$, г/км
Легковые	0.077	4	0.310	0.0045	0.00023
ЛКТ < 3.5 т	0.130	4	0.522	0.0075	0.00038
Грузовые 3.5 – 12 т	0.151	6	0.904	0.012	0.0006
Грузовые > 12 т	0.196	8	1.568	0.024	0.0012
Автобусы > 3.5 т	0.153	6	0.917	0.012	0.0006

Примечания: TSP_T – суммарный удельный пробеговый выброс частиц в результате износа одной покрышки, г/км; N – число колес у АТС; $\sum \text{TSP}_T$ – суммарный удельный пробеговый выброс частиц от всех покрышек одного АТС, г/км; PM_{10T} – фактор эмиссии PM_{10} за счет износа покрышек шин, г/км; $\text{PM}_{2.5T}$ – фактор эмиссии $\text{PM}_{2.5}$ за счет износа покрышек шин, г/км.

По оценкам зарубежных специалистов вклад продуктов износа шин составляет от 5 до 30 % в суммарном выбросе «невыхлопных» частиц.

Особую проблему составляет эмиссия в окружающую среду ВЧ, выделяющихся при использовании шипованных покрышек, но в данном исследовании этот вопрос не изучался.

4.3 Определение факторов эмиссии взвешенных частиц, поступающих в результате износа дорожного полотна

Среди доминирующих причин, способствующих разрушению асфальтобетонных покрытий можно выделить следующие [172-174]:

- физико-механические и химические качества асфальтобетонов;
- метеорологические условия (температура окружающей среды, осадки, фототермическое старение под воздействием солнечного излучения);
- особенности рельефа местности, свойства грунтов и т.д.;
- структура и интенсивность движения автотранспортных потоков.

Состав и физико-механические характеристики асфальтобетонных покрытий в Российской Федерации регулируются Межгосударственным стандартом ГОСТом 9128-2013 [175], который, помимо прочего, нормирует такие показатели, как: пористость, плотность, трещиностойкость, усталостную прочность, глубину вдавливания штампа, а также зерновые составы смесей с учетом вязкости полимерно-битумных вяжущих (ПБВ) на основе блоксополимеров типа стирол-бутадиен-стирол (СБС). Асфальтобетонные смеси на 91.0-96.5 % состоят из компонентов минерального происхождения (гравия, щебня, песка) и на 3.5-9.0 % из связующего битумного или битумно-полимерного компонента [176]. Для дорожных покрытий, в основном, используются асфальтобетонные смеси с содержанием битума от 3 до 5 %. Начальный состав материала покрытия определяет и состав веществ, присутствующих в общей пылевой фракции, которая на 95-97 % состоит из алюмосиликатов и на 3-5 % из органических веществ. Битумы при обычных условиях представляют собой твердые или смолоподобные продукты, состоящие из углеводов, а также из кислород-, азот- и серосодержащих производных. Опасными, с точки зрения токсичности, являются ПАУ, также входящие в состав битумов в виде естественных растворителей. В битумах были обнаружены такие канцерогенные ПАУ, как бенз- α -пирен, бенз- α -антрацен, бенз- γ -перилен, бензофлуорантены разных модификаций, нафталины и пр. Хотя содержание их в битуме не так

велико и составляет от 3 до 30 мг/кг, следует, тем не менее, учитывать количество ПАУ, попадающих в окружающую среду в результате износа дорожного покрытия.

Климатические и метеорологические особенности регионов также будут оказывать существенное влияние на прочностные характеристики асфальтобетонов. Низкие температуры окружающей среды приводят к хрупкости материалов, деформации химических связей в связующих органических компонентах и, как следствие, снижению сцепления между минеральными компонентами, высокие температуры приводят к размягчению покрытия и его деформации под воздействием движущихся ТС, т.е. образованию колеи. На связующие органические битумные вещества негативное влияние также оказывает процесс фотодеструкции под воздействием солнечной радиации. Атмосферные осадки тоже способствуют разрушению дорожного полотна. В работе [177] было показано, что износ дорожного покрытия в Скандинавских странах в зимний период возрастал в 2-6 раз.

Однако, очевидно, что именно последний из перечисленных факторов – движущиеся автотранспортные потоки, – оказывают наибольшее влияние на износ асфальтобетонных покрытий. Под действием нагрузки, передаваемой на колесо, шина сжимается в месте наезда на дорожное покрытие (зона А), а затем, на выходе из зоны контакта, в шине происходит расширение (зона Б).

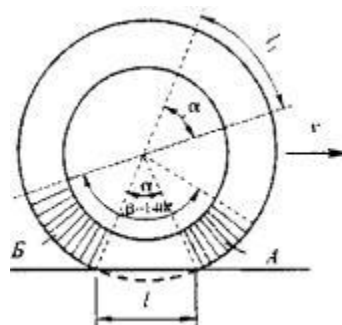


Рисунок 24 – Деформации шины колеса, способствующие износу покрытия: А - зона сжатия, Б - зона растяжения

Усиление касательных напряжений, возникающих в области контакта, приводит к износу дорожного полотна и покрышек АТС, проявляющегося в виде образования колеиности и выбоин. Очевидно, что в наибольшей степени эти явления характерны для процессов торможения и разгона, а также для движения на высоких скоростях.

Определение факторов эмиссии «невыхлопных» PM_{10} и $PM_{2.5}$ для разных категорий АТС, поступающих в атмосферный воздух за счет износа дорожного полотна, представляет определенные сложности, поскольку путем полевых измерений невозможно определить вклад каждой категории ТС в суммарный износ. Оценка вклада частиц по химическому составу пылевой фракции тоже весьма условна, поскольку практически невозможно установить, какая часть минеральных алюмосиликатных частиц поступила в виде наносной пыли, а какая в результате истирания дорожного покрытия.

Среднегодовой износ асфальтобетонных покрытий, в соответствии с действующим в Российской Федерации отраслевым методическим документом [178], составляет от 1.0 до 4.5 мм в год, в зависимости от интенсивности движения транспортных потоков (таблица 19).

Таблица 19 – Ориентировочные (расчетные) значения абразивного износа поверхности асфальтобетонного покрытия резиновыми колесами без шипов [178].

Категория дороги	I	II	III	IV
Суточная интенсивность движения автотранспорта, авт/сут	≥ 7000 (принято 7000–10000)	3000–7000 (ср. 5000)	1000–3000 (ср. 2000)	100–1000 (ср. 550)
Расчетная величина износа толщины слоя покрытия за год, мм/год	3.5–4.5 (ср. $\approx$ 4.0)	2.5	1.5	≤ 1.0

Расчет факторов эмиссии для пяти категорий ТС проводился с учетом геометрических размеров колеи, интенсивности движения и структуры АТП,

массы АТС. В качестве модельных были выбраны два участка улично-дорожной сети Санкт-Петербурга: участок от Заставской до Благодатной улицы на Московском проспекте и участок от Обводного канала до Заставской улицы на Митрофаньевском шоссе.

Алгоритм расчета описан ниже:

- Суточная интенсивность движения АТП на исследуемом участке Московского проспекта составляет, в среднем, 53500 легковых автомобилей, 5800 ЛКТ и 3252 автобуса (таблица 19), т.е. эта дорога относится к 1-ой категории дорог, для которых годовой износ толщины покрытия в колее составляет 4 мм (таблица 18).

- Натурные измерения показали, что, в среднем, ширина колеи равна 30 см. Для удобства расчетов колея представлялась в виде прямоугольного углубления. На этом участке всего восемь полос движения в каждом направлении, поэтому общее число колеи равно 16.

- Далее, путем простых алгебраических вычислений, с учетом объема образовавшихся колеи и плотности асфальтобетонного покрытия, равного 2.36 г/см^3 [177], был определен суточный износ дорожного покрытия на 1 км участка, составивший 124142 г/сут.

- Исходя из предположения, что нагрузка на дорожное полотно пропорциональна массе АТС, были установлены коэффициенты нагрузки для пяти категорий АТС (таблица 19).

- Затем, обозначая через x фактор эмиссии всей совокупности взвешенных частиц (TSP), поступающих в воздух от одного условного легкового автомобиля при износе 1 км дорожного полотна, учитывая коэффициент нагрузки для каждой категории АТС и суточный износ асфальтобетонного покрытия на 1 км участка, составляем уравнение:

$$53500x + 5800 \cdot 1.75x + 3252 \cdot 5x = 124142 \quad (6)$$

$$x = 1.55$$

- Потом, принимая во внимание коэффициенты нагрузки для остальных категорий, определяем для них суммарные удельные пробеговые выбросы частиц в результате износа дорожного полотна (TSP_{RW}) – таблица 20.

Таблица 20 – Исходные данные для определения факторов эмиссии взвешенных частиц в результате истирания дорожного полотна [PM_{iRW}], г/км, на примере Московского проспекта.

Категория ТС	Инт-ть, авт/сут	Масса ТС, т	Коеф-т нагрузки	TSP_{RW} , г/км	PM_{10RW} , г/км	$PM_{2.5RW}$, г/км
Легковые	53500	2	1	1.55	0.0078	0.0012
ЛКТ < 3.5 т	5800	3.5	1.75	2.71	0.0136	0.002
Автоб. > 3.5 т	3252	3.5-18	5	7.75	0.039	0.0058

Примечания: TSP_{RW} – суммарный удельный пробеговый выброс частиц в результате износа дорожного полотна, г/км; PM_{10RW} – фактор эмиссии PM_{10} за счет износа дорожного полотна, г/км; $PM_{2.5RW}$ – фактор эмиссии $PM_{2.5}$ за счет износа дорожного полотна, г/км.

- Согласно данным зарубежных ученых [166], только около 0.5 % частиц, поступающих в атмосферу в результате деструкции асфальтобетонного покрытия, представлен мелкодисперсной фракцией PM_{10} , из которых приблизительно 15 % составляют частицы $PM_{2.5}$. С учетом этих предположений и были рассчитаны факторы эмиссии PM_{10} и $PM_{2.5}$ за счет износа дорожного полотна (таблица 19).

Для проверки вышеизложенной гипотезы, расчеты факторов эмиссии PM_{10} и $PM_{2.5}$ были проведены для еще одной магистрали – Митрофаньевского шоссе. Митрофаньевское шоссе доступно для проезда не только легковых автомобилей, ЛКТ, автобусов, но и всех видов грузового автотранспорта.

- Суточная интенсивность движения АТП на исследуемом участке Митрофаньевского шоссе составляет, в среднем, 27300 легковых автомобилей, 3650 ЛКТ, 565 автобусов > 3.5 т, 3700 грузовых автомобилей от 3.5 до 12 т и 580 грузовых автомобилей > 12 т (таблица 20), т.е. эта дорога также относится к 1-ой категории дорог, для которых годовой износ толщины покрытия в колес составляет 4 мм (таблица 18).

- На этом участке всего две полосы движения в каждом направлении, поэтому общее число колеи равно 8.

- Используя выше изложенные допущения и предположения, получаем расчетные факторы эмиссии PM_{10} и $PM_{2.5}$ за счет износа дорожного полотна на примере Митрофаньевского шоссе. Результаты представлены в табл. 21.

Таблица 21 – Исходные данные для определения факторов эмиссии взвешенных частиц в результате истирания дорожного полотна [PM_{iRW}], г/км, на примере Митрофаньевского шоссе.

Категория ТС	Инт-ть, авт/сут	Масса ТС, т	Кэф-т нагрузки	TSP_{RW} , г/км	PM_{10RW} , г/км	$PM_{2.5RW}$, г/км
Легковые	27300	2	1	1.15	0.0058	0.0009
ЛКТ < 3.5 т	3650	3.5	1.75	2.01	0.0101	0.0015
Груз. 3.5 – 12 т	3700	3.5-12	4	4.6	0,023	0.0035
Груз. > 12 т	580	12-36	9	10.35	0,052	0.0044
Автоб. > 3.5 т	565	3.5-18	5	5.75	0,029	0.0078

Примечания: TSP_{RW} – суммарный удельный пробеговый выброс частиц в результате износа дорожного полотна, г/км; PM_{10RW} – фактор эмиссии PM_{10} за счет износа дорожного полотна, г/км; $PM_{2.5RW}$ – фактор эмиссии $PM_{2.5}$ за счет износа дорожного полотна, г/км.

Продолжительность износа асфальтобетонных покрытий при эксплуатации шин с цепями и шипами сокращается в 2-3 раза. Эта проблема чрезвычайно актуальна для Санкт-Петербурга, где период эксплуатации шипованных покрышек длится с октября по апрель.

4.4 Обоснование физической модели переноса ВЧ в окрестностях автодорог

Автомобильная дорога отличается от иных техногенных объектов, являющихся источниками генерации и эмиссии пылевидных частиц [180].

Особую проблему при разработки расчетной методики оценки загрязнения придорожной воздушной среды мелкодисперсными твердыми аэрозолями представляет задача оценки вклада процесса вторичного ресуспендирования частиц в результате разрушения ранее образовавшихся дорожных отложений

(наносного грунта, ранее осевших продуктов износа тормозных систем, покрышек шин, дорожного полотна, сажи и т.д.)

Процесс пылепереноса в воздушной среде над дорогой инициируется двумя физическими факторами:

- природными ветровыми потоками (в данном случае скорость ветра, направление ветра, а также геометрические характеристики прилегающей застройки будут определять интенсивность выноса частиц над дорогой);

- турбулентными воздушными потоками и завихрениями, создаваемыми движущимися автотранспортными средствами (в этом случае скорость движения и плотность автотранспортного потока будут определять интенсивность выноса частиц над дорогой).

Как уже отмечалось в главе 4, кроме процесса генерирования вторичной взвеси движущимися ТС, проблематична также задача определения вклада привнесенных извне пылевидных загрязнителей в суммарное загрязнение мелкодисперсными ВЧ дорожной среды, например, при перевозке сыпучих материалов (гравия, песка, керамзита, бетона и т.д.),

Эмиссия частиц при перевозки сыпучих материалов зависит от типа перевозимого груза, герметичности транспортного средства, скорости его движения и качества дорожного покрытия (на дорогах с поврежденным покрытием эмиссия частиц будет выше в результате качения и встряхивания автомобиля).

Исходя из очевидного предположения, что в сырую погоду при слабом или умеренном ветре концентрации ВЧ в окрестностях автодорог будут, в основном, формироваться за счет выбросов частиц от автотранспортных средств, а при длительной сухой погоде – в результате суммирования выбросов частиц от АТС и частиц, генерируемых при движении АТС, а также привнесенных извне, было предложено решить обратную задачу моделирования: определить расчетным путем значения приземной концентрации ВЧ, образующейся за счет выбросов от автотранспортных потоков, а затем оценить вклад наносных частиц и вторичной

взвеси в суммарную концентрацию путем вычитания расчетной приземной концентрации ВЧ из измеренной.

Для решения поставленной специфичной научной задачи физического моделирования процесса переноса и диффузии частиц в дорожной атмосфере в результате ресуспендирования грязевых отложений движущимися ТС предпочтение было отдано отечественной научной школе профессора Берлянда М.Е. [30].

В виду известной неопределенности источника генерации частиц, его характеристики предлагается оценивать путем постановки и решения локальной обратной задачи моделирования по методологии турбулентно-динамического режима эмиссии частиц (разработана Р.И. Оникулом и Е.А. Яковлевой [180]). Но уже применительно к выносу частиц из сыпучих отложений на дороге (по ранее описанному механизму) – в турбулентно-вихревой «след» (облако пыли, остающееся за движущимся автомобилем).

По аналогии с выше описанным подходом [180], было предложено рассмотреть пять условных модельных категорий источников: легковые автомобили; легкий коммерческий транспорт (до 3.5 т), грузовые автомобили от 3.5 до 12 т, грузовые автомобили > 12 т и автобусы > 3.5 т. Иными словами, были выделены группы автомобилей, отличающиеся как по массе, так и по геометрическим размерам.

При определении факторов эмиссии $PM_{2.5}$ и PM_{10} , образующихся в результате вторичного суспендирования дорожных отложений, я исходил из предположения, что сам этот процесс, а, следовательно, и концентрация $PM_{2.5}$ и PM_{10} в турбулентном «следе», будут зависеть от массы, геометрических размеров и скорости движения транспортного средства.

Принципиально важным параметром для реализации локальной физической модели эмиссии частиц с дорожного полотна в такой постановке обратной задачи моделирования становится скорость гравитационного оседания (W_g) частиц над

поверхностью дорожного полотна для частиц соответствующих размеров r_A (м) применительно ко всем модельным источникам частиц в транспортном процессе:

$$W_g = 1,3 \cdot 10^{-2} \cdot \rho_n \cdot r_A^2; \text{ (м/с)}, \quad (7)$$

где ρ_n – плотность частицы (г/м³); r_A – радиус частицы (м).

Формула (7) следует из известной формулы Стокса при использовании в ней коэффициента молекулярной вязкости воздуха [180]. Этим параметром будет, в основном, определяться время витания ВЧ в следовом облаке пыли модельного транспортного средства, то есть мощность выброса частиц виртуальным источником. После оценки мощности выброса «выхлопных» и «невыхлопных» частиц от условного единичного транспортного средства и от автотранспортного потока всеми источниками, решается задача прямого моделирования их распространения (диффузии) в стратифицированной атмосфере в окрестности автомагистрали с использованием методологии профессора М.Е. Берлянда [30].

В общей постановке задача загрязнения воздуха частицами малых размеров $PM_{2.5}$ и PM_{10} математически решается на основе уравнения атмосферной диффузии примесей частиц при определенных начальных и граничных условиях.

Для расчетной оценки концентраций взвешенных частиц на автомобильных дорогах был использован подход математического моделирования – так называемая К-теория [30]. При умеренных и умеренно высоких скоростях ветра вертикальное распределение мелкодисперсных аэрозольных примесей определяется уравнением турбулентной диффузии:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 (u_i + W_g) \frac{\partial q}{\partial x_i} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} K_i \frac{\partial q}{\partial x_i}, \quad \text{где} \quad (8)$$

q – рассчитываемая концентрация загрязнителя;

u_i – составляющие средней скорости ветра (т.е. средней скорости перемещения загрязнителя) в направлении декартовых координатных осей x_i ;

x_i ($i = 1, 2, 3$) – координаты загрязнителя, в дальнейшем обозначаются через x, y, z ;

K_i – компоненты коэффициента турбулентной диффузии вдоль декартовых координатных осей x_i ;

Wg – скорость гравитационного оседания ВЧ.

Использование данного фундаментального подхода математического моделирования турбулентной диффузии совместно с обоснованными упрощениями и эмпирическими уточнениями, рекомендуемыми нормативным документом по расчету рассеивания вредных веществ в атмосферном воздухе «ОНД-86» [29], позволяет производить оценку рассеивания вредных веществ в атмосферном воздухе от неорганизованных линейных источников выбросов, к которым относится автотранспорт, согласно следующей формуле:

$$C_m = \frac{AMFm\eta}{H^{7/3}}, \quad (9)$$

где A – коэффициент, учитывающий температурную стратификацию (устойчивость) атмосферы. Для Центральной части РФ $A = 120$, для областей со средними условиями турбулентного перемешивания $A = 160$;

M – мощность эмиссии загрязняющего вещества, выбрасываемого потоком автомобилей в единицу времени (г/с); F – безразмерный коэффициент, зависящий от скорости гравитационного оседания взвешенных частиц (РМ). Значение параметра F принимается равным 1 расчета рассеивания РМ от двигателей автомобилей; m – безразмерный коэффициент, равный 0,9; η – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, в случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км, $\eta = 1$; H – высота магистрали, как неорганизованного источника выброса, над уровнем земли.

Посредством выше описанного расчетного алгоритма, реализованного в прикладном программном обеспечении Excel, были определены факторы эмиссии РМ₁₀ и РМ_{2,5}, поступающих в воздух в виде вторичной взвеси и наносных частиц. Усредненные значения определенных факторов эмиссии РМ₁₀ и РМ_{2,5},

эмитируемых в придорожный воздух в результате износа дорожного полотна, тормозных колодок, покрышек шин и вторичного суспендирования представлены в итоговой таблице 22.

Таблица 22 – Факторы эмиссии PM_{10} и $PM_{2.5}$, эмитируемых в придорожный воздух в результате износа тормозных колодок, покрышек шин, дорожного полотна и вторичного суспендирования.

Категория АТС	PM_B		PM_T		PM_R		PM_S^*	
	PM_{10B} , г/км	$PM_{2.5B}$, г/км	PM_{10T} , г/км	$PM_{2.5T}$, г/км	PM_{10R} , г/км	$PM_{2.5R}$, г/км	PM_{10S} , г/км	$PM_{2.5S}$, г/км
Легковые	0.0056	0.0034	0.0045	0.00023	0.0068	0.0011	0.0051	0.00041
ЛКТ < 3.5	0.008	0.0048	0.0075	0.00038	0.011	0.0017	0.012	0.00031
Грузовые 3.5 – 12 т	0.016	0.0096	0.012	0.0006	0.023	0.0023	0.037	0.0008
Грузовые > 12 т	0.0232	0.0139	0.024	0.0012	0.052	0.0078	0.062	0.0018
Автобусы > 3.5 т	0.0144	0.0086	0.012	0.0006	0.034	0.0051	0.054	0.0018

Примечания: * Факторы эмиссии для вторичной взвеси учитываются только при сильных грязевых отложениях на дорогах; PM_B – выброс ВЧ за счет износа тормозных колодок; PM_T – выброс ВЧ за счет износа покрышек шин; PM_R – выброс ВЧ за счет износа дорожного полотна; PM_S – выброс ВЧ за счет вторичного суспендирования; PM_{10B} – фактор эмиссии PM_{10} за счет износа тормозных колодок, г/км; $PM_{2.5B}$ – фактор эмиссии $PM_{2.5}$ за счет износа тормозных колодок, г/км; PM_{10T} – фактор эмиссии PM_{10} за счет износа покрышек шин, г/км; $PM_{2.5T}$ – фактор эмиссии $PM_{2.5}$ за счет износа покрышек шин, г/км; PM_{10R} – фактор эмиссии PM_{10} за счет износа дорожного полотна, г/км; $PM_{2.5R}$ – фактор эмиссии $PM_{2.5}$ за счет износа дорожного полотна, г/км; PM_{10S} – фактор эмиссии PM_{10} за счет вторичного суспендирования взвеси, г/км; $PM_{2.5S}$ – фактор эмиссии $PM_{2.5}$ за счет вторичного суспендирования взвеси, г/км.

Полученные значения факторов эмиссии хорошо согласуются со значениями, приведенными в зарубежных методологиях по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух CEPMEIP, RAINS, ЕМЕР/ЕА.

4.5 Выводы по разделу

- Впервые в Российской Федерации разработана расчетная методика и компьютерная программа, совместимая с действующими российскими и зарубежными программно-методическими средствами, для количественной оценки и прогнозирования загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$ с оценкой вклада сажевых частиц, продуктов износа шин, тормозных колодок, дорожного полотна и вторичной взвеси.

- Для пяти категорий транспортных средств (легковых автомобилей, легкого коммерческого транспорта (до 3.5 т), грузовых автомобилей от 3.5 до 12 т, грузовых автомобилей > 12 т, автобусов > 3.5 т) определены факторы эмиссии PM_{10} и $PM_{2.5}$ за счет износа тормозных колодок, покрышек шин и дорожного полотна и вторичного суспендирования. Полученные значения рекомендуется использовать для внесения изменений в «Методику определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов» и в «Методику определения выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух от автотранспортных потоков, движущихся по автомагистралям Санкт-Петербурга» Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности правительства Санкт-Петербурга.

- Обоснована физическая модель переноса ВЧ в окрестностях автомагистралей; обосновано применение уравнение турбулентной диффузии загрязняющих примесей для прогнозирования мгновенных концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ вблизи автодорог с учетом скорости гравитационного оседания мелкодисперсных аэрозолей.

5 Расчетное исследование экстремального загрязнения придорожного воздушного слоя взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$ вблизи ряда автомагистралей Санкт-Петербурга с интенсивным движением

Расчетные исследования по оценке выбросов концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ в придорожном воздушном слое вблизи автомагистралей Санкт-Петербурга (табл. 2) осуществляли с использованием программных продуктов «Магистраль» и «Эколог-город» фирмы «Интеграл», в которые были внесены определенные в ходе исследования факторы эмиссии «выхлопных» и «невыхлопных» PM_{10} и $PM_{2.5}$ (табл. 5).

Расчетные значения мощности выбросов PM_{10} и $PM_{2.5}$ от разных источников на Московском проспекте, на участке от Обводного канала до Благодатной улицы Митрофаньевского шоссе и на участке от проспекта Обуховской Обороны до Софийской улицы КАД Санкт-Петербурга в часы максимальной транспортной нагрузки представлены в таблица 23.

Таблица 23 – Расчетные значения мощности выбросов PM_{10} и $PM_{2.5}$ на автодорогах Санкт-Петербурга в часы пик.

Тип загрязняющего вещества	Мощность выбросов, г/с		
	Московский проспект	Митрофаньевское шоссе (на участке от Обводного канала до Благодатной ул.)	КАД СПб (на участке от пр. Обуховской Обороны до Софийской ул.)
PM_{10} суммарно	0.049	0.155	10.12
PM_{10} «выхлопные»	0.018	0.096	5.78
PM_{10} «невыхлопные» ($PM_B + PM_T + PM_R$)	0.031	0.059	4.34
$PM_{2.5}$ суммарно	0.028	0.124	7.01
$PM_{2.5}$ «выхлопные»	0.018	0.096	5.78
$PM_{2.5}$ «невыхлопные» ($PM_B + PM_T + PM_R$)	0.010	0.018	1.23

Примечания: PM_B – выброс ВЧ за счет износа тормозных колодок; PM_T – выброс ВЧ за счет износа покрышек шин; PM_R – выброс ВЧ за счет износа дорожного полотна.

Результаты расчетов на примере Московского проспекта показали, что на дорогах города, где запрещен проезд для грузового транспорта, вклады «выхлопных» и «невыхлопных» частиц PM_{10} в суммарном выбросе составляют

36.7 и 63.3 %, соответственно. Таким образом, было доказано, что на таких магистралях загрязнение воздушного бассейна взвешенными частицами происходит преимущественно за счет «невыхлопных» выбросов, обусловленных износом тормозных колодок, покрышек шин, дорожного полотна, вторичной взвесью и наносными частицами. На Митрофаньевском шоссе, где грузовой транспорт составляет более 10 % автотранспортного потока, вклад «выхлопных» и «невыхлопных» частиц в суммарный выброс PM_{10} оценивается в 61.9 и 38.1 %, а на КАД, где чрезвычайно высока интенсивность движения, как легкового, так и грузового автотранспорта, – в 57.1 и 42.9 %, соответственно.

Расчетные значения содержания $PM_{2.5}$ во фракции PM_{10} в придорожном воздухе автомагистралей, хорошо коррелируют с результатами экспериментальных измерений: на Московском проспекте расчетное значение соотношения $PM_{2.5}/PM_{10}$ равно 0.57, а полученное на основании измеренных концентраций – 0.48, на Митрофаньевском шоссе расчетное значение соотношения $PM_{2.5}/PM_{10}$ равно 0.8, а экспериментально полученное – 0.74, на КАД – 0.7 и 0.59, соответственно. Т.е. расхождение расчетных данных с результатами, полученными путем натурных экспериментов, составляет 4-11 %.

Полученные расчетные значения концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ также хорошо коррелируют с результатами собственных измерений и данными, полученными мобильной лабораторией, что свидетельствует об эффективности разработанной экспериментально-расчетной методики мониторинга и прогнозирования уровня загрязнения придорожной воздушной среды мелкодисперсными взвешенными частицами.

В качестве примера на рисунке 25 представлены результаты расчетов загрязнения воздуха PM_{10} на одном из наиболее загруженных участков Кольцевой автомобильной дороги – от пересечения с проспектом Обуховской Обороны до пересечения с Софийской улицей. На рис. 25 (а) визуализированы, в виде изолиний, суммарные поля концентраций PM_{10} . На рис. 25 (б) и 25 (в) отражены,

соответственно, вклады «выхлопных» и «невыхлопных» выбросов частиц в формирование концентраций PM_{10} .



Рисунок 25 (а) – Визуализация загрязнения приземного воздушного бассейна частицами PM_{10} на участке от Софийской улицы до проспекта Обуховской Обороны на КАД СПб



Рисунок 25 (б) – Визуализация загрязнения приземного воздушного бассейна «выхлопными» частицами PM₁₀ на участке от Софийской улицы до проспекта Обуховской Обороны на КАД
СПб



Рисунок 25 (в) – Визуализация загрязнения приземного воздушного бассейна «невыхлопными» частицами PM₁₀ на участке от Софийской улицы до проспекта Обуховской Обороны на КАД СПб

Показана возможность возникновения чрезвычайного локального загрязнения воздуха PM₁₀ на максимально загруженных участках магистрали с превышением ПДК_{СС} в 7.5 и более раз, и загрязнения воздушного бассейна прилегающих жилых кварталов с превышением ПДК_{СС} в 1.5-5 раз.

Заключение

1. Впервые в Российской Федерации на примере Санкт-Петербурга разработана методика экспериментально-расчетного мониторинга и прогнозирования экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях и в их окрестностях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$ с оценкой вклада сажевых частиц, продуктов износа шин, тормозных колодок и дорожного полотна.

2. Определены факторы эмиссии PM_{10} и $PM_{2.5}$ за счет износа тормозных колодок, покрышек шин и дорожного полотна. Полученные значения рекомендуется использовать для внесения изменений в «Методику определения выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух от автотранспортных потоков, движущихся по автомагистралям Санкт-Петербурга» Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности правительства Санкт-Петербурга.

3. На основании экспериментальных мониторинговых исследований содержания ВЧ в придорожном воздухе автомагистралей на примере Санкт-Петербурга было установлено, что:

- в целом, в городе погодные условия способствуют оседанию и рассеиванию мелкодисперсных частиц, поэтому вблизи автодорог с потоками автотранспорта от 2500 до 4000 авт/ч, свободных от проезда грузового транспорта (Московский и Лиговский проспекты), и с долей грузового транспорта до 10 % (проспект Славы, Пискаревский проспект, Митрофаньевское шоссе, Колтушское шоссе), при благоприятных и нормальных благоприятных (наиболее типичных для Санкт-Петербурга) метеорологических условиях (БМУ и НБМУ), концентрации взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ не превышают ПДК_{СС}, установленные в РФ, изменяясь в пределах 10-60 мкг/м³ и 3-35 мкг/м³, соответственно.

- На наиболее загруженных участках КАД Санкт-Петербурга, с высокой интенсивностью движения от 7500 до 13000 авт/ч и высокой долей тяжелого

дизельного грузового транспорта (до 25 %), даже при нормальных благоприятных метеоусловиях, типичных для Санкт-Петербурга (переменной облачности, умеренной/высокой влажности, умеренной скорости ветра (3-10 м/с)) наблюдалось **опасное** превышение содержания PM_{10} и $PM_{2.5}$ относительно ПДК_{СГ} до 1.8 и 1.2 раз, соответственно.

- Высокая загрязненность дорожной среды грязевыми отложениями в весенний период в сочетании с неблагоприятными метеоусловиями (длительной ясной сухой погодой, низкой/умеренной влажностью, штилевой погодой или, наоборот, при сильном ветре, способствующем устойчивому витанию в воздухе ВЧ) приводят к формированию **опасно высоких** концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$, превышающих ПДК_{СС} в 2-4.5 и 1.2-3.5 раза, соответственно. На Лиговском проспекте, проспекте Славы и Пискаревском проспекте ПДК_{СС} $PM_{2.5}$ была превышена в 1.3-1.8 раз, а ПДК_{СС} PM_{10} в 1.2-2.1 раза. На автомагистралях с долей грузового транспорта от 10 % и более – Митрофаньевском шоссе, Колтушском шоссе и КАД, – ПДК_{СС} $PM_{2.5}$ была превышена в 2.5-3.3 раза, а ПДК_{СС} PM_{10} в 3.3-4.3 раза.

- Независимо от метеорологических условий, на дорогах города периодически (при проведении дорожных и земляных работ, сухой уборке городских улиц, проезде сильно дымящих грузовых автомобилей или грузовых автомобилей с пылящими сыпучими материалами) имеют место эпизоды краткосрочного локального **экстремально высокого** загрязнения воздушной среды ВЧ с многократным превышением ПДК_{МР} (до 50 и более раз).

4. Анализ дисперсного состава ВЧ показал, что во фракции PM_{10} содержание более опасного аэрозоля $PM_{2.5}$ достаточно высоко и составляет, в среднем, при благоприятных и нормальных благоприятных метеоусловиях (высокой / умеренной влажности, слабom/умеренном ветре) 56.8 ± 10.1 %, а при неблагоприятных метеоусловиях (низкой влажности / сильном ветре) – 39.9 ± 11.0 %. Наибольшее процентное содержание $PM_{2.5}$ характерно для автомагистралей, разрешенных для проезда грузового транспорта, и составляет 59.6 ± 10.3 %. На

автодорогах, свободных от грузового транспорта, содержание $PM_{2.5}$ составляет 49.8 ± 2.8 %.

5. В результате корреляционно-регрессионного анализа было установлено, что наиболее сильная взаимосвязь наблюдалась между концентрациями PM_{10} и $PM_{2.5}$ и интенсивностью движения автотранспортных потоков, значения r составили 0.7842 и 0.6884, соответственно, и между концентрациями PM_{10} и $PM_{2.5}$ и относительной влажностью воздуха, значения r составили (-0.7748) и (-0.7082), корреляционная связь между концентрациями PM_{10} и $PM_{2.5}$ и температурой воздуха не наблюдалась.

Влияние ветровой нагрузки на рассеивание и оседание мелкодисперсных ВЧ в окрестностях автомобильных дорог неоднозначно. С одной стороны, было подтверждено, что при высокой скорости ветра (> 15 м/с) в условиях длительной сухой погоды при высоком загрязнении автодорог грязевыми отложениями формируются пылевые поземки, приводящие к высоким концентрациям PM_{10} и $PM_{2.5}$. С другой стороны, высокие концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ также наблюдаются при штилевой погоде и в значительной степени коррелируют с концентрациями NO_x и углеводородных загрязнителей, что свидетельствует о вторичном процессе формирования мелкодисперсных аэрозолей в условиях высокого загрязнения атмосферы газообразными поллютантами. Вопрос вторичного образования ультрадисперсных взвешенных частиц из газообразных поллютантов в результате физико-химических превращений, протекающих в атмосфере, требует дальнейших исследований.

6. Впервые в Российской Федерации на примере Санкт-Петербурга с помощью новой методики были проведены расчетные исследования загрязнения воздушной среды вблизи ряда автомагистралей взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$ с оценкой вклада разных источников. Было показано, что на автомагистралях, свободных от проезда грузового транспорта (Московском и Лиговском проспектах), примерно две трети частиц PM_{10} поступают в результате эмиссии в атмосферный воздух «невыхлопных» PM_{10} ,

образующихся при износе тормозных колодок, покрышек шин и дорожного полотна. На автодорогах, разрешенных для проезда всех категорий грузовых автомобилей (проспекте Славы, Пискаревском проспекте, Митрофаньевском шоссе, Колтушском шоссе и КАД), вклад «выхлопных» частиц в суммарный выброс PM_{10} составляет 50-60 %, а «невыхлопных» – 40-50 %.

7. Расчетные исследования загрязнения атмосферного воздуха PM_{10} вблизи Кольцевой автомобильной дороги Санкт-Петербурга, показали возможность чрезвычайно высокого локального загрязнения воздуха PM_{10} непосредственно на автомагистрали с превышением ПДК в 7.5 и более раз, и высокого загрязнения воздушного бассейна прилегающих жилых кварталов с превышением ПДК в 1.5-5 раз. Ситуации чрезвычайного локального загрязнения воздушной среды в окрестностях автомобильных дорог, длительность воздействия которых значительно больше 20 минут, следует признать опасными для населения, проживающих в домах, примыкающих к таким магистралям.

8. Проведенные исследования позволили выявить направления последующих изысканий, актуальных для городов Российской Федерации:

- Необходимо оценить влияние шипованных покрышек на износ дорожного полотна и на количественный и качественный состав ВЧ, поступающих в атмосферу за счет износа покрышек.

- Необходимо исследовать роль фотохимических превращений и физических процессов в приземной атмосфере, в результате которых из газообразных поллютантов (преимущественно оксидов азота и углеводородов) образуются вторичные ультрадисперсные взвешенные частицы.

Список сокращений и условных обозначений

ВЧ	- взвешенные частицы
PM	- взвешенные частицы (англ. Particulate Matter)
PM ₁₀	- взвешенные частицы с аэродинамическим диаметром менее 10 мкм
PM _{2.5}	- взвешенные частицы с аэродинамическим диаметром менее 2.5 мкм
TSP	- общее количество взвешенных частиц (англ. Total Suspended Particles)
NO	- монооксид азота
NO ₂	- диоксид азота
N ₂ O	- закись азота
NH ₃	- аммиак
NO _x	- оксиды азота (монооксид азота и диоксид азота суммарно)
SO ₂	- диоксид серы
O ₃	- озон
ПАУ	- полициклические ароматические углеводороды
CO	- оксид углерода
CO ₂	- диоксид углерода
SO ₂	- диоксид серы
C _x H _y	- нелетучие углеводороды
ЛОС	- летучие органические соединения
НМЛОС	- неметановые летучие органические соединения
C	- углерод
SiO ₂	- оксид кремния
ЧУ	- черный углерод (фракция сажи с аэродинамическим диаметром менее 2.5 мкм, по аналогии с английским black carbon)
РФ	- Российская Федерация

МЧС - Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий

США - Соединенные Штаты Америки

ЕС - Европейский Союз

ВОЗ - Всемирная организация здравоохранения

ЧС - чрезвычайная ситуация

РСЧС - единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций

Комитет - Комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности правительства

Санкт-Петербурга

ГИБДД - Государственная инспекция безопасности дорожного движения

КАД - кольцевая автомобильная дорога

АСИЗВ - автоматическая станция измерения загрязнения воздуха

НМУ - неблагоприятные метеорологические условия для оседания ВЧ

БМУ - благоприятные метеороусловия для оседания ВЧ

НБМУ - нормальные благоприятные метеороусловия для оседания ВЧ

ТЭК - топливно-энергетический комплекс

ЭК - экологический класс

УВ - удельный выброс

ЗВ - загрязняющее вещество

ОГ - отработавшие газы

ЛКТ - легкий коммерческий автотранспорт (микроавтобусы и автофургоны)

АТС - автотранспортное средство

ТС - транспортное средство

АТП - автотранспортный поток

ИД	- интенсивность движения
авт/ч	- автомобилей в час
авт/сут	- автомобилей в сутки
ПДК _{мр}	- предельно-допустимая максимальная разовая концентрация (20-минутное осреднение)
ПДК _{сс}	- предельно-допустимая среднесуточная концентрация (24-часовое осреднение)
ПДК _{сг}	- предельно-допустимая среднегодовая концентрация (годовое осреднение)
ПДК _{PM2.5мр}	- предельно-допустимая максимальная разовая концентрация в воздухе частиц PM _{2.5} .
ПДК _{PM10мр}	- предельно-допустимая максимальная разовая концентрация в воздухе частиц PM ₁₀
ПДК _{PM2.5сс}	- предельно-допустимая среднесуточная концентрация в воздухе частиц PM _{2.5}
ПДК _{PM10сс}	- предельно-допустимая среднесуточная концентрация в воздухе частиц PM ₁₀
ПДК _{PM2.5сг}	- предельно-допустимая среднегодовая концентрация в воздухе частиц PM _{2.5}
ПДК _{PM10сг}	- предельно-допустимая среднегодовая концентрация в воздухе частиц PM ₁₀
ДВ	- доверительная вероятность
ДИ	- доверительный интервал

Список литературы

1. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2014 году: Государственный доклад. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2015. – 206 с.
2. ДОКЛАД ОБ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ В 2014 ГОДУ / Под редакцией И.А. Серебрицкого. – СПб.: ООО «Дитон», 2015. – 180 с.
3. Environment Air Quality // Directorate-General for Environment of the European Commission. Режим доступа: <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/>
4. United States Environmental Protection Agency. Air Science. Режим доступа: <http://www.epa.gov/science-and-technology/air-science>
5. Воздействие взвешенных частиц на здоровье. – Всемирная организация здравоохранения, 2013 г. – 20 с.
6. J. H. Seinfeld, S.N. Pandis. Atmospheric chemistry and physics. – 2006. – John Wiley & Sons Inc. – 1203 p.
7. Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. – Москва : Наука, 1981. – 174 с.
8. Генихович Е.Л., Грачева И.Г., Ионин В.А., Оникул Р.И., Румянцев Д.Ю., Филатова Е.Н., Яковлева Е.А. Моделирование характеристик загрязнения воздуха атмосферными аэрозолями для практических приложений // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2012. № 565. С. 49-78.
9. Ивлев Л.С. АЭРОЗОЛИ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА // Общество. Среда. Развитие. – 2013. – № 1 (26). – с. 225-231.
10. Ивлев Л.С., Довгало Ю.А. ГЕТЕРОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ РОСТА АЭРОЗОЛЕЙ ВЕРХНЕЙ ТРОПОСФЕРЫ И СТРАТОСФЕРЫ //Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. –2015. – № 577. – с. 65-105.
11. Ивлев Л.С. АЭРОЗОЛИ И ОБЛАЧНОСТЬ, КАК ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКТОР // Региональная экология. – 2013. – № 1-2 (34). – с. 130-137.

12. Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы. М.: Мир, 1965. – 423 с.
13. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд. ЛГУ, 1982. – с. 368.
14. Справочник по профилактической патологии. – Москва: Мысль, 1979. – 637 с.
15. Словарь по загрязнению атмосферного воздуха (терминологически-й) / перевод с английского. – Копенгаген: ВОЗ, 1982. – 156 с.
16. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. – Л.: Изд. ЛГУ, 1982. – 368 с.
17. Ивлев Л.С., Довгало Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 2000. – 256 с.
18. Лушников А.А., Загайнов В.А. Кинетическая эффективность конденсации при произвольной вероятности прилипания молекул к частицам // Изв. РАН. – 2002. – Т. 387. – № 2. – с. 192–199.
19. К. Спурный, Ч. Иех. Аэрозоли. Москва: Атомиздат, 1964. – 360 с.
20. Kent E. Pinkerton. A CRITICAL REVIEW OF THE PARTICULATE MATTER TOXICOLOGY LITERATURE FOR SENATE BILL 25 REVIEW OF THE PARTICULATE MATTER STANDARD. Final Report Air Resources Board Contract Number 00-327. – Cal/EPA, 2002. – 93 p.
21. R. F. Phalen. The Particulate Air Pollution Controversy: A Case Study and Lessons Learned. – Kluwer Academic Publisher, 2006. – 123 p.
22. Seaton A., Godden D., MacNee W. et al. Particulate air pollution and acute health effects // Lancet. – 1995. V. 345. – p. 176–178.
23. Pope C.A. III Review: epidemiological basis for particulate air pollution health standards // Aerosol. Sci. Tech. – 2000. V. 32. p. 4–14.
24. Pope C.A., Dockery D.W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect // J. Air Waste Manag. – 2006. V. 56. – p. 709–742.

25. Krewski D., Jerrett M., Burnett R.T. et al. Extended follow-up and spatial analysis of the American Cancer Society study linking particulate air pollution and mortality. – Boston, MA, Health Effects Institute, 2009.
26. Jerrett M., Burnett R.T., Ma R. et al. Spatial analysis of air pollution and mortality in Los Angeles // *Epidemiology*. – 2005. – V.16. – p. 727–736.
27. Pope C.A.I, Burnett R.T., Thun M.J. et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution // *JAMA*. – 2002. V. 287. – p. 1132–1141.
28. J. Lelieveld, J.S. Evans, M. Fnais, D. Giannadaki and A. Pozzer. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale // *Nature*. 2015. – V. 525, p. 367-371.
29. X. Xue, X.D. Sun, M. Han, B. Li, C.P. Ma, J. Yu, H. Sun, Z.R. Zhao et al. Long-term exposure to high particulate matter pollution and cardiovascular mortality: A 12-year cohort study in four cities in northern China // *Environ. Int.* 2014 V. 62. – p. 41-47.
30. Guo Y., Li S., Tian Z., Pan X., Zhang J., Williams G. The burden of air pollution on years of life lost in Beijing, China, 2004–08: Retrospective regression analysis of daily deaths // *BMJ*. – 2013. – V. 347. – doi:10.1136/bmj.f7139.
31. Lim S.S., Vos T., Flaxman A.D., Danaei G et al. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: A systematic analysis for the global burden of disease study 2010 // *Lancet* 2012. – V 380. – p. 2224–2260.
32. Pope A., Dockery W. Air pollution and life expectancy in China and beyond // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. – 2013. – V. 110. – p. 12861-12862.
33. Zeng X., Xu X., Reponen T., Chen A., Huo X. Heavy metals in PM_{2.5} and in blood, and children's respiratory symptoms and asthma from an e-waste recycling area // *Environ Pollut*. 2016. – V. 210. – p. 346-353.

34. Heinzerling A., Hsu J., Yip F. Respiratory Health Effects of Ultrafine Particles in Children: A Literature Review // *Water Air Soil Pollut.* - 2016 – V. 227 – in press.

35. Rodopoulou S., Samoli E., Chalbot M.C., Kavouras I.G. Air pollution and cardiovascular and respiratory emergency visits in Central Arkansas: A time-series analysis // *Sci. Total Environ.* – 2015. – V. 536. – p. 872-879.

36. Fuertes E., Bracher J., Flexeder C., Markevych I., Klümper C., Hoffmann B., Krämer U., von Berg A., Bauer C.P., Koletzko S., Berdel D., Heinrich J., Schulz H. Long-term air pollution exposure and lung function in 15 year-old adolescents living in an urban and rural area in Germany: The GINIplus and LISAplus cohorts // *Int J Hyg Environ Health.* – 2015. – V. 218 (7). – p. 656-665.

37. Tétreault L.F., Doucet M., Gamache P., Fournier M., Brand A., Kosatsky T., Smargiassi A. Childhood Exposure to Ambient Air Pollutants and the Onset of Asthma: An Administrative Cohort Study in Québec // *Environ Health Perspect.* – 2016. – in press.

38. Watanabe M., Noma H., Kurai J., Sano H., Mikami M., Yamamoto H., Ueda Y., Touge H., Fujii Y., Ikeda T., Tokuyasu H., Konishi T., Yamasaki A., Igishi T., Shimizu E.. Effect of Asian dust on pulmonary function in adult asthma patients in western Japan: A panel study // *Allergol. Int.* – 2015. – V. 15. – p. 198.

39. Strickland M.J., Hao H., Hu X., Chang H.H., Darrow L.A., Liu Y. Pediatric Emergency Visits and Short-Term Changes in PM_{2.5} Concentrations in the U.S. State of Georgia // *Environ. Health Perspect.* – 2015. – in press.

40. Darrow L.A., Klein M., Flanders W.D., Mulholland J.A., Tolbert P.E., Strickland M.J. Air pollution and acute respiratory infections among children 0-4 years of age: an 18-year time-series study // *Am. J. Epidemiol.* – 2014. V. 180 (10). p. 968-977.

41. De P Pablo-Romero M., Román R., Limón J.M., Praena-Crespo M. Effects of fine particles on children's hospital admissions for respiratory health in Seville, Spain // *J. Air Waste Manag. Assoc.* – 2015. – V.65 (4). P. – 436-444.

42. Т.Е. Лим, А.Ю. Недре, Ю.А. Недре. Анализ заболеваемости болезнями органов дыхания взрослого населения Санкт-Петербурга в зависимости от качества атмосферного воздуха // Здоровье населения и среда обитания. –

2014. – № 1 (250). – с. 26–28.

43. Т.Е. Лим, И.В. Чернявская. Оценка риска для здоровья населения от воздействия выбросов автотранспорта // Санитарный врач. – 2014. - № 9.

– с. 12-15.

44. К.Б. Фридман, Т.Е. Лим, С.Н. Шусталов. К вопросу гигиенической оценки транспортных загрязнений и влияния их на здоровье населения // Экология человека. – Архангельск, 2012. – № 6. – с. 3–9.

45. Лим, Т.Е. Уровень заболеваемости детского населения, проживающего на территории прохождения КАД // Вестник Санкт-Петербургской государственной медицинской академии им. Мечникова. – 2007. – № 2. – с. 43–44.

46. Турбина Е.С. ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАЩИХСЯ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ НА ЗАБОЛЕВАЕМОСТЬ ДЕТЕЙ-ДОШКОЛЬНИКОВ // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. – 2010. – № 2. – с. 102-109.

47. Петров С.Б., Онучина Е.Н. ЭКОЛОГО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ НА РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ БОЛЕЗНЕЙ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ В ГОРОДСКОЙ ДЕТСКОЙ ПОПУЛЯЦИИ // Здоровье населения и среда обитания. – 2011. – № 6. – с. 20-23.

48. Петров С.Б. ЭКОЛОГО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ НА РАЗВИТИЕ БОЛЕЗНЕЙ СИСТЕМЫ КРОВООБРАЩЕНИЯ // Экология человека. – 2011. – № 2. – с. 3-7.

49. COUNCIL DIRECTIVE 1999/30/EC of 22 April 1999 relating to limit values for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air. Режим доступа: <http://eur-lex.europa.eu/legal->

content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.1999.163.01.0041.01.ENG&toc=OJ:L:1999:163:TOC

50. DIRECTIVE 2008/50/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. Режим доступа:

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX:32008L0050>

51. USA National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) Режим доступа: <http://www3.epa.gov/ttn/naaqs/criteria.html>

52. ГН 2.1.6.2604-10 «Дополнение №8 к ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест».

53. Black carbon. Basic information. Режим доступа: <http://www3.epa.gov/blackcarbon/basic.html>

54. N.A.H. Janssen, M.E. Gerlofs-Nijland, T. Lanki et al. Health effects of black carbon. - World Health Organization, 2012. – 96 p.

55. Генихович Е.Л., Киселев А.В., Смирнова И.В., Чичерин С.С. К АНАЛИЗУ ПОСЛЕДСТВИЙ ВЫСОКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА МОСКВЫ ЛЕТОМ 2010 Г. // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2012. – № 565. – с. 79-88.

56. Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б., Березина Е.В., Елохов А.С., Иванов В.А., Панкратова Н.В., Постыляков О.В., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Шумский Р.А. ГАЗОВЫЙ СОСТАВ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ В МОСКВЕ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЛЕТА // Доклады Академии наук. – 2011. – Т. 437. – № 1. – с. 90-96.

57. Звягинцев А.М., Блюм О.Б., Глазкова А.А., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Миллер Е.А., Миляев В.А., Попиков А.П., Семутникова Е.Г., Тарасова О.А., Шалыгина И.Ю. // АНОМАЛИИ КОНЦЕНТРАЦИЙ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В ВОЗДУХЕ

ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ И УКРАИНЫ ЛЕТОМ 2010 Г. // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. – № 7. – с. 582-588.

58. Звягинцев А.М., Блюм О.Б., Глазкова А.А., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Миллер Е.А., Миляев В.А., Попиков А.П., Семутникова Е.Г., Тарасова О.А., Шалыгина И.Ю. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ И УКРАИНЕ В УСЛОВИЯХ ЖАРКОГО ЛЕТА 2010 Г. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 47. – № 6. – с. 757.

59. Y.-L. Zhang, F. Cao. Fine particulate matter (PM_{2.5}) in China at a city level // Nature. Scientific Reports 5. – 2015. – Режим доступа: <http://www.nature.com/articles/srep14884>

60. Cui L.L., Zhang J., Zhou J.W., Zhang Y., Li T.T. Acute respiratory and cardiovascular health effects of an air pollution event January 2013, Jinan, China // Public Health. – 2016. – V. 131. – p. 99-102.

61. Lin H., Tao J., Du Yet al. Differentiating the effects of characteristics of PM pollution on mortality from ischemic and hemorrhagic strokes // Int. J. Hyg. Environ. Health. – 2015. - doi: 10.1016/j.ijheh.2015.11.002.

62. Brook R.D., Sun Z., Brook J.R., Zhao X. et al. Extreme Air Pollution Conditions Adversely Affect Blood Pressure and Insulin Resistance: The Air Pollution and Cardiometabolic Disease Study // Hypertension. - 2016. – V. 67(1). – p. 77-85.

63. Liu L., Breitner S., Schneider A., Cyrus J. et al. Size-fractioned particulate air pollution and cardiovascular emergency room visits in Beijing, China // Environ. Res. – 2013. – V. 121. – p. 52-63.

64. Lin H., Tao J., Du Y. et al. Particle size and chemical constituents of ambient particulate pollution associated with cardiovascular mortality in Guangzhou, China // Environ. Pollut. – 2016. – V. 208. – p. 758-766.

65. Beijing air pollution // Soth China Morning Post. – 2015. - Режим доступа: <http://www.scmp.com/topics/beijing-air-pollution>

66. Li Jing and Wendy Wu. Beijing's air quality is supposed to be improving so why is the city still shrouded in smog? // Soth China Morning Post. – December 2015.

Режим доступа:

<http://www.scmp.com/news/china/policies-politics/article/1896400/beijings-air-quality-supposed-be-improving-so-why-cityoo>

67. Caijing. China's Haze "More Horrible" than SARS Epidemic, Expert Warns.

Режим доступа:

<http://englishcaijingcomcn/2013-01-31/112478574.html>

68. Pollution Makes Beijing almost 'Uninhabitable for Human Beings' // Soth China Morning Post. – November 2015. – Режим доступа:

<http://www.scmp.com/news/china/article/1426587/pollution-makes-beijing-almost-uninhabitable-human-beings>

69. Sophie Landrin et Laetitia Van Eeckhout. La pollution à Paris aussi nocive que le tabagisme passif // Le Monde. – Novembre 2014. - Режим доступа:

http://www.lemonde.fr/planete/article/2014/11/24/a-paris-la-pollution-est-aussi-nocive-que-le-tabagisme-passif_4528203_3244.html#0F3MMrJs0hf2hwFk.99

70. Bentayeb M., Wagner V., Stempfelet M. et al. Association between long-term exposure to air pollution and mortality in France: A 25-year follow-up study // Environ. Int. – 2015. – V. 85. – p. 5-14.

71. Bertin M., Chevrier C., Serrano T. Association between prenatal exposure to traffic-related air pollution and preterm birth in the PELAGIE mother-child cohort, Brittany, France. Does the urban-rural context matter? // Environ. Res. – 2015. V. 142. – p. 17-24.

72. Экологическая обстановка в Санкт-Петербурге с 12 по 19 марта 2015 года. Режим доступа: <http://www.infoeco.ru/index.php?id=1664>

73. Пыльное небо Петербурга. Петербургская интернет-газета «Фонтанка», 18.03.15. Режим доступа: <http://www.fontanka.ru/2015/03/18/071/>

74. Пыль в глаза Петербургу. Петербургская интернет-газета «Фонтанка», 19.03.15. Петербургская интернет-газета «Фонтанка», 19.03.15. Режим доступа: <http://www.fontanka.ru/2015/03/19/060/>

75. Мониторинг качества атмосферного воздуха для оценки воздействия на здоровье человека // Региональные публикации ВОЗ. Европейская серия. № 85. – Изд-во ВОЗ, 2001. – 293 с.

76. Оникул Р.И., Яковлева Е.А. О расчете дальности видимости при существенном антропогенном аэрозольном загрязнении воздуха у земной поверхности // Вопросы охраны атмосферы от загрязнения: информационно-справочное пособие / Под ред. В.Д. Николаева. – СПб.: НПК «Атмосфера», 2010. – 238 с.

77. Кароль И.Л., Решетников А.И. ПАРНИКОВЫЕ ГАЗЫ, АЭРОЗОЛИ И КЛИМАТ // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2014. – № 573. – с. 5-39.

78. Довгальук Ю.А., Дорофеев Е.В., Синькевич А.А., Комаровских К.Ф., Веремей Н.Е. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ САЖЕВОГО АЭРОЗОЛЯ НА ЭВОЛЮЦИЮ КОНВЕКТИВНОГО ОБЛАКА ПРИ СИЛЬНОМ АЭРОЗОЛЬНОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ АТМОСФЕРЫ // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2014. – № 572. – с. 30-44.

79. Ивлев Л.С., Довгальук Ю.А. ГЕТЕРОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ РОСТА АЭРОЗОЛЕЙ ВЕРХНЕЙ ТРОПОСФЕРЫ И СТРАТОСФЕРЫ // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2015. – № 577. – с. 65-105.

80. Морозов В.Н. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ СУБМИКРОННОГО ДИАПАЗОНА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОВОДИМОСТЬ ВОЗДУХА И НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ (ОБЗОР) // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2015. – № 577. – с. 47-64

81. Азаров В.Н., Трохимчук М.В., Трохимчук К.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЫЛИ В ЗОНАХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТВАЛОВ // В сборнике: Актуальные проблемы гидролитосферы (диагностика, прогноз, управление, оптимизация и автоматизация) Сборник докладов. Редакционная коллегия: Бородавкин П.П., Малков А.В., Першин И.М. – 2015. – с. 280-288.

82. Азаров В.Н., Кошкарёв С.А., Николенко М.А., Бурханова Р.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЫБРОСОВ ПЫЛИ АСБЕСТОЦЕМЕНТА В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ ВЛИЯНИЯ НА КАЧЕСТВО ЖИЗНИ РАБОТАЮЩИХ // Инженерный вестник Дона. – 2014. – Т. 30. – № 3. – с. 51.

83. Донцова Т.В., Храпов С.С., Азаров В.Н. О МОДЕЛИРОВАНИИ ДИНАМИКИ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ ГОРОДОВ // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 12 (134). – с. 67-72.

84. Азаров В.Н., Маринин Н.А., Барикаева Н.С., Лопатина Т.Н. О ЗАГРЯЗНЕНИИ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛЬЮ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2013. – № 1. – с. 30-34.

85. Трохимчук К.А., Храпов С.С., Лапынин Ю.Г., Малярчук Ю.Д. Исследование динамики воздушных потоков при земляных работах в зонах антропогенной // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2 (часть 14). – с. 3065-3069.

86. Трохимчук К.А. О влиянии ГРЭС на загрязненность мелкодисперсной пылью городских территорий // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 12. – с. 73-76.

87. Трохимчук К.А. О загрязнении воздушной среды городских территорий при земляных работах // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – № 17/18. – с. 133-137.

88. Азаров В.Н., Тертишников И.В., Маринин Н.А. Нормирование РМ10 и РМ2,5 как социальных стандартов качества в районах расположения предприятий стройиндустрии // Журнал жилищное строительство. – 2012. – Вып. 3.

89. Азаров В.Н., Юркьян В.Ю., Сергина Н.М. Методика микроскопического анализа дисперсного состава пыли с применением персонального компьютера (ПК) // Законодательная и прикладная метрология. – 2004. – № 1. – с. 46-48.

90. В. Н. Азаров, Н. С. Барикаева. УЧЕТ ПЫЛЕВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ И ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ // Вестник ВолгГАСУ. – 2012. – № 29 (48) – с. 213-217.

91. O. Hänninen, G. Hoek, E. Mallone, S., Chellini, C. Katsouyanni K., Gariazzo, G. Cattani, A. Marconi, P. Molnar, and T. Bellander. Seasonal patterns of outdoor pm infiltration into indoor environments: review and meta-analysis of available studies from different climatological zones in Europe // Air Quality, Atmos. and Health. – 2011. – V. 4(3 – 4). – p. 221-233.

92. J. P. Jalkanen, L. Johansson, J. Kukkonen, A. Brink, J. Kalli, and T. Stipa. Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide // Atmos. Chem. Phys. – 2011. – V. 12. –p. 2641-2659.

93. N. Janssen, G. Hoek, M. Simic-Lawson, P. Fischer, L. Bree, H. Ten-Brink, M. Keuken, R. Atkinson, H. Anderson, B. Brunekreef, and F. Cassee. Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared with pm10 and pm2.5 // Environ. Health Per. – 2011. – V. 19(12). – p. 1691-1699.

94. M.P. Keuken, S. Jonkers, P. Zandveldet al. Elemental carbon as an indicator for evaluating the impact of traffic measures on air quality and health // Atmospheric Environment - 2012. – V. 61. – p. 1-8.

95. M. Kauhaniemi, J. Kukkonen, J. Härkönen, J. Nikmo, L. Kangas, G. Omstedt, M. Ketzel, A. Kousa, M. Haakana, and A. Karppinen. Evaluation of a road dust suspension model for predicting the concentrations of pm10 in a street canyon // Atmos. Environ. – 2011. – V. 45(22). – p. 3646–3654.

96. M.P. Keuken, J.S. Henzing, P. Zandveld, S. van den Elshout, M. Karl. Dispersion of particle numbers and elemental carbon from road traffic, a harbor and an airstrip in the Netherlands // *Atmos. Environ.* – 2011. – V.54. – p. 320-327.

97. J. Kukkonen, T. Olsson, D. M. Schultz et al. Review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe // *Atmos. Chem. Phys.* – 2012. – V.12(1). – p. 1–87.

98. J. Langner, M. Engardt, A. Baklanov et al. A multi-model study of impacts of climate change on surface ozone in Europe // *Atmos. Chem. Phys.* – 2012. – V. 12. – p. 10423-10440.

99. V. Penenko, A. Baklanov, E. Tsvetora, and A. Mahura. Direct and inverse problems in a variational concept of environmental modelling // *Pure Appl. Geophys.* – 2012. – V. 169. – p. 447–465.

100. A. Vlachogianni, P. Kassomenos, Ari Karppinen, S. Karakitsios, and Jaakko Kukkonen. Evaluation of a multiple regression model for the forecasting of the concentrations of NO_x and PM₁₀ in Athens and Helsinki // *Sci. Total Environ.* – 2011. – V. 409 (8). – p. 1559–1571.

101. Transport related Air Pollution and Health impacts - Integrated Methodologies for Assessing Particulate Matter. Режим доступа: <http://transphorm.eu/>

102. Lozhkina O.V., Lozhkin V.N. Estimation of nitrogen oxides emissions from petrol and diesel passenger cars by means of on-board monitoring: effect of vehicle speed, vehicle technology, engine type on the emission rates // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, in press.

103. Ложкин В.Н. ОПАСНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО «ПРЕССИНГА» В КРУПНЫХ ГОРОДАХ РОССИИ МОСТ. – 1999. – № 1-2. – С. 37.

104. Ложкин В.Н., Артамонов В.С., Баскин Ю.Г. К ВОПРОСУ УПРАВЛЕНИЯ РИСКОМ БИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА НА НАСЕЛЕНИЕ КРУПНОГО ГОРОДА

Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. – 2000. – № 4. – С. 110.

105. Ложкин В.Н., Буренин Н.С., Медейко В.В. СОВРЕМЕННЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К АВТОТРАНСПОРТУ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ Транспорт Российской Федерации. – 2005. – № 1 (1). – С. 64-65.

106. Ложкин В.Н., Медейко В.В. МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, США И СТРАНАХ ЕС, ПРИ ГОСУДАРСТВЕННОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ Информационный бюллетень РФФИ. – 2005. – № 2. – С. 103.

107. Ложкин В.Н., Маляров О.С., Кристенсенс Н.Б. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ВЫБРОСАМИ АВТОТРАНСПОРТА ПРИ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ Проблемы управления рисками в техносфере. – 2007. – № 3-4. – С. 68.

108. Ложкин В.Н., Мигулев С.Е., Маляров О.С. НОВЫЙ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ Вестник гражданских инженеров. – 2008. – № 4. – С. 104-110.

109. Ложкин В.Н., Мигулев С.Е., Гавкалюк Б.В. ОРГАНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОЦЕССА МОНИТОРИНГА ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРАНСПОРТА НА ГОРОДСКУЮ СРЕДУ Проблемы управления рисками в техносфере. – 2009. – Т. 9-10. – № 1-2. – С. 177-184.

110. Ложкин В.Н., Маляров О.С. КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА АТМОСФЕРЫ Проблемы управления рисками в техносфере. – 2009. – Т. 12. – № 4. – С. 128-133.

111. Ложкин В.Н., Мигулев С.Е., Ложкина О.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА В ДОЛГОСРОЧНОЙ ПЕРСПЕКТИВЕ (НА ПРИМЕРЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА) Автотранспортное предприятие. – 2010. – № 4. – С. 25-27.

112. Ложкина О.В., Новиков В.Р., Осипов Д.В., Ложкин В.Н. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ НА АТМОСФЕРУ ГОРОДОВ (НА ПРИМЕРЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА) Двигателестроение. – 2010. – № 4. – С. 19-21.

113. Ложкин В.Н. ОБ ОЦЕНКЕ УДЕЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ АТМОСФЕРУ ВЕЩЕСТВ АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ Охрана атмосферного воздуха. Атмосфера. – 2011. – № 2. – С. 37.

114. Ложкин В.Н., Ложкина О.В. ПЕРСПЕКТИВЫ СОКРАЩЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА ОТ АВТОТРАНСПОРТА В ГОРОДАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ПРИМЕРЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА Биосфера. – 2011. – Т. 3. – № 3. – С. 409-418.

115. Ложкин В.Н., Ложкина О.В. АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ И СУДЬБА БИОСФЕРЫ - МОЖНО ЛИ ИЗБЕЖАТЬ ПРОТИВОСТОЯНИЯ? Общество. Среда. Развитие. – 2011. – № 2. – С. 208-214.

116. Ложкин В.Н., Буренин Н.С., Лукьянов С.В., Ложкина О.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ АВТОТРАНСПОРТА НА ВОЗДУШНУЮ СРЕДУ НА ПРИМЕРЕ КОЛЬЦЕВОЙ АВТОМАГИСТРАЛИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА Вестник гражданских инженеров. 2011. – № 4. – С. 117-122.

117. Ложкин В.Н., Лукьянов С.В., Ложкина О.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ВБЛИЗИ КАД САНКТ-ПЕТЕРБУРГА Технико-технологические проблемы сервиса. – 2012. – Т. 20. – № 2. – С. 7-14.

118. Ложкина О.В., Марченко В.С., Ложкин В.Н., Лакеев Д.А. БОРТОВОЙ МОНИТОРИНГ УДЕЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ NOX, ВЫДЕЛЯЮЩИХСЯ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ ЛЕГКОВОГО АВТОТРАНСПОРТА, НА АВТОДОРОГАХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 5 (34). – С. 195-198.

119. Ложкина О.В., Марченко В.С., Новиков В.Р., Ложкин В.Н. ОЦЕНКА УДЕЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ ОКИСЛОВ АЗОТА ЛЕГКОВЫМ АВТОТРАНСПОРТОМ Двигателестроение. – 2012. – № 4. – С. 35-41.

120. Ложкина О.В., Ложкин В.Н., Головина Н.М. ЕВРОПЕЙСКОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ CORERT ДЛЯ ПРАКТИКИ РАСЧЕТОВ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ АВТОТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ В РФ Охрана окружающей среды и природопользование. – 2013. – № 4. – С. 11-20.

121. Ložkin V., Ložkina O., Ušakov A. USING K-THEORY IN GEOGRAPHIC INFORMATION INVESTIGATIONS OF CRITICAL-LEVEL POLLUTION OF ATMOSPHERE IN THE VICINITY OF MOTOR ROADS World Applied Sciences Journal. – 2013. – Т. 23. – № 13. – С. 96-100.

122. Ложкина О.В., Ложкин В.Н. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЫБРОСОВ ПОЛЛЮТАНТОВ И ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ АВТОТРАНСПОРТОМ ПО ЕВРОПЕЙСКОЙ МЕТОДОЛОГИИ CORERT, АДАПТИРОВАННОЙ К УСЛОВИЯМ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА Проблемы управления рисками в техносфере. – 2013. – № 4. – С. 51.

123. Ложкин В.Н., Ложкина О.В., Солодухин Д.И. О МЕТОДИЧЕСКОЙ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ОКРЕСТНОСТИ АВТОМАГИСТРАЛИ Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". – 2014. – № 3. – С. 25-31.

124. Марченко В.С., Ложкина О.В., Сорокина О.В., Ложкин В.Н. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНОГО ЛОКАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА ОКСИДАМИ АЗОТА ВБЛИЗИ АВТОДОРОГ Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 2 (49). – С. 149-154.

125. Lozhkina O.V., Lozhkin V.N. ESTIMATION OF ROAD TRANSPORT RELATED AIR POLLUTION IN SAINT PETERSBURG USING EUROPEAN AND RUSSIAN CALCULATION MODELS Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2015. – Т. 36. – С. 178-189.

126. Кравченко П.А ОРГАНИЗАЦИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В БОЛЬШИХ ГОРОДАХ. Наука и техника в дорожной отрасли. – 2013. – № 1 (64). – С. 1-2.

127. Федоров В.А., Кравченко П.А. КАРДИНАЛЬНОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАКОНОДАТЕЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДТП В РОССИИ // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 2 (45). – С. 14-18.

128. Кравченко П.А., Плотников А.М КОМБИНИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ НА МНОГОПОЛОСНЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКАХ, МИНИМИЗИРУЮЩЕЕ УРОВЕНЬ ДОРОЖНОЙ ОПАСНОСТИ. Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 6 (35). – С. 139-142.

129. Кравченко П.А ПРОБЛЕМА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ДЕТСКОГО ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОГО ТРАВМАТИЗМА В НОВОЙ КОНЦЕПЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ В РОССИИ Кравченко П.А. // Автотранспортное предприятие. – 2007. – № 1. – С. 6-8.

130. Пшенин В.Н., Коваленко В.И. Загрязнение ливневых стоков с автомобильных дорог // Вестник ИНЖЭКОНА. – 2007. – №6(19). – С. 140–145.

131. Волкодаева М.В., Лёвкин А.В., Демина К.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШУМОВЫХ КАРТ ГОРОДА ДЛЯ ВЫБОРА УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ // Noise Theory and Practice. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 22-31.Уф

132. Ложкин В.Н., Николаенко А.В. Экологические проблемы автомобильного транспорта в России и пути их решения // Двигателестроение. – 2002. – № 4.

133. Ложкин В.Н., Чумак А.И., Кристенсен Н.Б. Результаты и перспективы использования датского опыта по моделированию «внешних издержек» от загрязнения атмосферы транспортом применительно к условиям Санкт-Петербурга // В сб.: Вопросы охраны атмосферы от загрязнения. Инф. бюлл. № 2(26), НПК «Атмосфера», ГГО им. А.И. Воейкова, – СПб., 2002.

134. Волкодаева М.В., Федина Ж.Т. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОСТАВА ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В Г. АРХАНГЕЛЬСК // Безопасность в техносфере. – 2014. – Т. 3. – № 2. – С. 64-67.

135. Ложкина О.В., Ложкин В.Н., Савинов А.Г. Способы уменьшения влияния моечных комп-лексов для автомобильного транспорта на водные экосистемы путем ис-пользования экологи-чески дружественных моющих средств // Информационный бюллетень №2 (40): «Вопросы охраны атмосферы от загрязнения», НПК «Атмосфера» при ГГО им. А. И. Воейкова, СПб., 2009 –с.

136. Волкодаева М.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ ВЫБОРЕ СЦЕНАРИЕВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ // ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ Безопасность в техносфере. – 2013. – Т. 2. – № 4 (43). – С. 8-11.

137. Цыплакова Е.Г., Литовка О.П., Янкевич Ю.Г. Оценка экологической опасности безгаражного хранения автотранспорта и его воздействия на состояние селитебных территорий исторической части Санкт-Петербурга. // Журнал Российской академии наук. Региональная экология. № 1-2.(26)2006.- с. 88-93.

138. Цыплакова Е.Г., Т.А. Шаповалова. Ю.Г. Янкевич Оценка экологической опасности объектов автотранспортного комплекса и их

воздействия на состояние селитебных территорий северных городов России на примере Магадана // Журнал Российской академии наук. Региональная экология. № 1-2.(26)2006.- с. 136-141.

139. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2014 году / Под редакцией И.А. Серебрицкого – СПб.: ООО «Дитон», 2015. – 180 с.

140. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2014 году / Под редакцией И.А. Серебрицкого – СПб.: ООО «Единый строительный дом, 2014. – 178 с.

141. Официальный интернет-сайт Агентства по охране окружающей среды Соединенных Штатов. Режим доступа: www.epa.gov.

142. Tier 3 Vehicle Emission and Fuel Standards Program. Режим доступа: <https://www3.epa.gov/otaq/tier3.htm>

143. Официальный сайт Генерального Директората Европейской Комиссии по Окружающей среде. Режим доступа: <http://ec.europa.eu/environment/air/transport/index.htm>.

144. Постановление Правительства Российской Федерации от 12 октября 2005 г. N 609 «Об утверждении специального технического регламента "О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации, вредных (загрязняющих) веществ"».

145. Постановление Правительства РФ от 20 января 2012 г. N 2 "О внесении изменений в специальный технический регламент "О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации, вредных (загрязняющих) веществ"».

146. Постановление Правительства Российской Федерации от 27 февраля 2008 г. N 118 г. "Об утверждении технического регламента "О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту"».

147. Постановлением Правительства Российской Федерации от 7 сентября 2011 г. N 748 "О внесении изменений в технический регламент "О требованиях к

автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту".

148. "ТРАНСПОРТНАЯ СТРАТЕГИЯ Российской Федерации на период до 2030 года", утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734.

149. Марченко В.С. Методика оценки чрезвычайного локального загрязнения оксидами азота приземной воздушной среды вблизи автодорог // Дис. на соискание уч. ст. канд. тех. наук. – СПб.: СПбУГПС МЧС России, 2015. – 166 с.

150. Методика определения выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух от автотранспортных потоков, движущихся по автомагистралям Санкт-Петербурга // Утверждена распоряжением Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности правительства Санкт-Петербурга от 17.02.2012 N 23-р).

151. Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов // СПб, ОАО «НИИ Атмосфера», 2010.

152. А.В. Рузский, В.В. Донченко, Ю.И. Кунин и др. Расчетная инструкция (методика) по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ от автотранспортных средств на территории крупнейших городов. – М.: Автополис-плюс, 2008. – 80 с

153. Расчетная инструкция (методика) по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ от автотранспортных средств на территории крупнейших городов (на примере г. Москвы). М., 2012.

154. Перечень методик, используемых в 2016 году для расчета, нормирования и контроля выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. СПб.: АО «НИИ Атмосфера», 2015. – 43 с. Режим доступа: http://www.nii-atmosphere.ru/PUBL/perechen_2016.pdf

155. Распоряжение Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Правительства Санкт-

Петербурга от 23.12.2011 N 177-р "Об утверждении Методических рекомендаций по обеспечению качества измерений концентраций взвешенных частиц (PM₁₀ и PM_{2,5}) в атмосферном воздухе Санкт-Петербурга". – СПб, 2011.

156. Волкодаева М.В. Научно-методические основы оценки воздействия автотранспорта на атмосферный воздух // Диссертация на соискание ученой степени доктора наук. – СПб.: СЗТУ, 2009. – 283 с.

157. Полуэктова М.М. Метод оценки загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом с использованием геоинформационных систем // Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук. – СПб.: ГГО им. Воейкова, 2009. – 165 с.

158. МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИЙ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ, СОДЕРЖАЩИХСЯ В ВЫБРОСАХ ПРЕДПРИЯТИЙ. ОНД-86. // Под ред. М.Я. Берлянда, Н.К. Гасилиной, Е.Л. Гениховича, Р.И. Оникула (Госкомгидромет СССР) и В.А. Глухарева (Госстрой СССР). – Л.: ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ, 1987. – 93 с.

159. Оникул Р.И., Яковлева Е.А. Анализ отраслевых методов расчета параметров наземных площадных пылящих источников и предложения по их усовершенствованию. // Информационный бюллетень №1-2 (41-42): «Вопросы охраны атмосферы от загрязнения», НПК «Атмосфера» при ГГО им. А. И. Воейкова, СПб. – 2010. – с. 6-32.

160. Невмержицкий Н.В., Ложкина О.В., Цветков В.А. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНО ОПАСНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ВЗВЕШЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ // В сборнике: Измерения в современном мире – 2015. Сборник научных трудов 5-ой Всероссийской научно-практической конференции, 2015. – с. 161-171.

161. Ложкин В.Н., Невмержицкий Н.В. О РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПАСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ PM_{2,5} И PM₁₀ В ОКРЕСТНОСТИ АВТОМАГИСТРАЛИ // Научно-аналитический журнал

"Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". – 2015. № 2. – с. 13-23.

162. Ложкин В.Н., Ложкина О.В., Невмержицкий Н.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ВЗВЕШЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ НА АВТОДОРОГАХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА С ОЦЕНКОЙ ВКЛАДА РАЗНЫХ ИСТОЧНИКОВ // В сборнике: ТРАНСПОРТ РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ – 2015. Материалы Юбилейной Международной научно-практической конференции, 2015. – с. 84-88.

163. Дерффель К. Статистика в аналитической химии. Пер. с нем. – М.: Мир, 1994. – 268 с.

164. Brake and Tire Wear Emissions in MOVES 2014 // MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator) Режим доступа: <https://www3.epa.gov/otaq/models/moves/>

165. L. Ntziachristos, P. Boulter. Road vehicle tyre and brake wear. Road surface wear // ЕМЕР/ЕЕА emission inventory guidebook 2013. – 34 p.

166. T. Grigoratos and G. Martini. Non-exhaust traffic related emissions. Brake and tyre wear PM Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014. – 53 p.

167. J. A. Kelly. An Overview of the RAINS Model // Environmental Protection Agency, 2006 – 35 p.

168. Boulter P. G. A review of emission factors and models for road vehicle non-exhaust particulate matter // TRL Report PPR065. TRL Limited, Wokingham, UK, 2005.

169. Kauhaniemi M., Stojiljkovic A., Pirjola L et al 2014. Comparison of the predictions of two road dust emission models with the measurements of a mobile van // Atmos. Chem. Phys. – 2014. – 14. – pp. 9155-9169.

170. ГОСТ Р 50507-93 «Изделия фрикционные тормозные. Общие технические требования».

171. ГОСТ Р 54095-2010. «РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ. Требования к экобезопасной утилизации отработавших шин».

172. Филатов А.Е. О НЕОБХОДИМОСТИ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПРОДУКТОВ ИЗНОСА ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ГОРОДОВ // Режим доступа: <http://www.scienceforum.ru/2016/pdf/26253.pdf>

173. Леванчук А.В. Загрязнение окружающей среды продуктами эксплуатационного износа автомобильных дорог //Науковедение. – № 1 (20). – 2014. Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/zagryaznenie-okruzhayuschey-sredy-produktami-ekspluatatsionnogo-iznosa-avtomobilnyh-dorog>

174. Леванчук А.В. Гигиеническая характеристика воздушной среды в зоне влияния дорожно-автомобильного комплекса // Медицина и образование в Сибири, Режим доступа: http://ngmu.ru/cozo/mos/article/text_full.php?id=1627

175. ГОСТ 9128-2013. Межгосударственный стандарт «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия».

176. ГОСТ 9128-2009. Межгосударственный стандарт «СМЕСИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫЕ ДОРОЖНЫЕ, АЭРОДРОМНЫЕ И АСФАЛЬТОБЕТОН»

177. Kupiainen K., Tervahattu H., Räisänen M. Experimental studies about the impact of traction sand on urban road dust composition // Science of the Total Environment. – 2003. –Vol. 308. – p. 175–184.

178. Отраслевой дорожный методический документ. Рекомендации по выявлению и устранению колеи на нежестких дорожных одеждах. – М.: Информавтодор, 2002. – 180 с.

179. Оникул Р.И., Яковлева Е.А. О специфике процессов выноса частиц полидисперсной пыли в атмосферу с участков подстилающей поверхности ограниченных размеров и формирования пыльных поземков / В кн.: Вопросы

охраны атмосферы от загрязнения: Информационный бюллетень. – СПб.: НПК «Атмосфера» при ГГО им Воейкова, 2011. – № 1-2 (43-44). – С. 53-68.

Приложение А Стандарты Евро 1 - Евро 6

Стандарты Евро 1 - Евро 6 для легковых автомобилей

Экологический стандарт	Оксид углерода (CO)	Углеводороды (HC)	Летучие органические вещества (ЛОС)	Оксиды азота (NO _x)	HC+NO _x	Взвешенные частицы (PM)
Для дизельного двигателя						
Евро-1	2.72 (3.16)	-	-	-	0.97 (1.13)	0.14 (0.18)
Евро-2	1.0	-	-	-	0.7	0.08
Евро-3	0.64	-	-	0.50	0.56	0.05
Евро-4	0.50	-	-	0.25	0.30	0.025
Евро-5	0.500	-	-	0.180	0.230	0.005
Евро-6	0.500	-	-	0.080	0.170	0.005
Для бензинового двигателя						
Евро-1	2.72 (3.16)	-	-	-	0.97 (1.13)	-
Евро-2	2.2	-	-	-	0.5	-
Евро-3	2.3	0.20	-	0.15	-	-
Евро-4	1.0	0.10	-	0.08	-	-
Евро-5	1.000	0.100	0.068	0.060	-	0.005**
Евро-6	1.000	0.100	0.068	0.060	-	0.005**

Стандарты Евро 1 - Евро 6 для лёгкого коммерческого транспорта:

1) Для автомобилей с массой ≤ 1305 кг (Категория N₁-I), г/км (Категория N₁)

Класс	CO	HC	ЛОС	NO _x	HC+NO _x	PM
Дизельные двигатели						
Евро 1	2.72	-	-	-	0.97	0.14
Евро 2	1.0	-	-	-	0.7	0.08
Евро 3	0.64	-	-	0.50	0.56	0.05
Евро 4	0.50	-	-	0.25	0.30	0.025
Евро 5	0.500	-	-	0.180	0.230	0.005
Евро 6 (в будущем)	0.500	-	-	0.080	0.170	0.005
Бензиновые двигатели						
Евро 1	2.72	-	-	-	0.97	-
Евро 2	2.2	-	-	-	0.5	-
Евро 3	2.3	0.20	-	0.15	-	-
Евро 4	1.0	0.10	-	0.08	-	-
Евро 5	1.000	0.100	0.068	0.060	-	0.005*
Евро 6 (в будущем)	1.000	0.100	0.068	0.060	-	0.005*

2) Для автомобилей с массой 1305 – 1760 кг, г/км (Категория N_{1-II})

Класс	CO	HC	ЛОС	NO _x	HC+NO _x	PM
Дизельные двигатели						
Евро 1	5.17	-	-	-	1.4	0.19
Евро 2	1.25	-	-	-	1.0	0.12
Евро 3	0.80	-	-	0.65	0.72	0.07
Евро 4	0.63	-	-	0.33	0.39	0.04
Евро 5	0.630	-	-	0.235	0.295	0.005
Евро 6	0.630	-	-	0.105	0.195	0.005
Бензиновые двигатели						
Евро 1	5.17	-	-	-	1.4	-
Евро 2	4.0	-	-	-	0.6	-
Евро 3	4.17	0.25	-	0.18	-	-
Евро 4	1.81	0.13	-	0.10	-	-
Евро 5	1.810	0.130	0.090	0.075	-	0.005*
Евро 6	1.810	0.130	0.090	0.075	-	0.005*

3) Для автомобилей с массой > 1760 кг, макс. Массой 3500 кг, г/км (Категория N_{1-III} & N₂)

Класс	CO	HC	ЛОС	NO _x	HC+NO _x	PM
Дизельные двигатели						
Евро 1	6.9	-	-	-	1.7	0.25
Евро 2	1.5	-	-	-	1.2	0.17
Евро 3	0.95	-	-	0.78	0.86	0.10
Евро 4	0.74	-	-	0.39	0.46	0.06
Евро 5 (в будущем)	0.740	-	-	0.280	0.350	0.005
Евро 6 (в будущем)	0.740	-	-	0.125	0.215	0.005
Бензиновые двигатели						
Евро 1	6.9	-	-	-	1.7	-
Евро 2	5.0	-	-	-	0.7	-
Евро 3	5.22	0.29	-	0.21	-	-
Евро 4	2.27	0.16	-	0.11	-	-
Евро 5 (в будущем)	2.270	0.160	0.108	0.082	-	0.005*
Евро 6 (в будущем)	2.270	0.160	0.108	0.082	-	0.005*

Экологические стандарты Евро 1 - Евро 6 для грузовых автомобилей и автобусов с дизельными двигателями, г/кВтч

Класс	СО	НС	NO _x	PM	Дымность
Евро 1	4.5	1.1	8.0	0.612	
	4.5	1.1	8.0	0.36	
Евро 2	4.0	1.1	7.0	0.25	
	4.0	1.1	7.0	0.15	
Евро 3	1.0	0.25	2.0	0.02	0.15
	2.1	0.66	5.0	0.10	0.8
Евро 4	1.5	0.46	3.5	0.02	0.5
Евро 5	1.5	0.46	2.0	0.02	0.5
Евро 6	1.5	0.13	0.5	0.01	

Экологические стандарты для большегрузного транспорта Категории N2, EDC, (2000 и выше)

Стандарт	СО (г/кВт)	NO _x (г./кВт)	НС (г/кВт)	PM (г/кВт.ч)
Евро 0	12.3	15.8	2.6	-
Евро 1	4.9	9.0	1.23	0.40
Евро 2	4.0	7.0	1.1	0.15
Евро 3	2.1	5.0	0.66	0.1
Евро 4	1.5	3.5	0.46	0.02
Евро 5	1.5	2.0	0.46	0.02

Приложение Б Полевой журнал

ПОЛЕВОЙ ЖУРНАЛ

обследования характеристик движущегося автотранспортного потока

(Название автодороги, направление движения)

(Ширина проезжей части, количество полос движения)

Характеристика прилегающей застройки (этажность зданий, высота, плотность застройки)

Дата	Время	Число автомобилей по группам					Скорость движения потока, км/ч		
		Л	АМ	$\Gamma < 12$	$\Gamma > 12$	$A > 3,5$	Легко вые	Грузо- вые	Автобусы
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

- 1) - легковые автомобили (Л);
- 2) - автофургоны и микроавтобусы до 3,5 т (АМ);
- 3) - грузовые автомобили от 3,5 до 12 т ($\Gamma <_{12}$);
- 4) - грузовые автомобили свыше 12 т ($\Gamma >_{12}$);
- 5) - автобусы свыше 3,5 т ($A >_{3,5}$).

Приложение В Акты о внедрении результатов исследования



НИИ АТМОСФЕРА

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «Научно-исследовательский институт охраны атмосферного воздуха» АО «НИИ Атмосфера»

194021, г.Санкт-Петербург, ул.Карбышева, 7, тел./факс: (812) 297-8662
E-mail: info@nii-atmosphere.ru, http://www.nii-atmosphere.ru
ОКПО: 23126426, ОГРН: 1097847184555, ИНН/КПП: 7802474128 / 780201001

Исх 07-2-847/16-0 от 09.11. 2016 г.
На № _____ от _____ 2016 г.

Утверждаю:

Генеральный директор АО
«Научно-исследовательский
институт охраны атмосферного
воздуха»



О.А.Марцынковский

16.11.2016 2016 г.

АКТ

о внедрении результатов исследования,
полученных в диссертации Н.В. Невмержицкого на тему: «Методика оценки и прогнозирования экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM10 и PM2.5» по специальности 05.26.02 – безопасность в чрезвычайных ситуациях (транспорт).

Комиссия в составе:

председателя: начальника лаборатории методологии нормирования выбросов в атмосферу, заместителя начальника отдела методических основ нормирования и установления технических нормативов выбросов, кандидата географических наук Буренина Николая Сергеевича;

членов комиссии:

научного сотрудника лаборатории методологии нормирования выбросов в атмосферу Панфилова Вадима Станиславовича,

ведущего инженера лаборатории методологии нормирования выбросов в атмосферу Нахимовской Ирины Николаевны,

настоящим подтверждает, что результаты диссертационного исследования были использованы при разработке «Методики определения выбросов авто-

транспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов», разработанной ОАО «НИИ Атмосфера», Санкт-Петербург, 2010 г., в части уточнения значений удельных пробеговых выбросов сажевых частиц с отработавшими газами автотранспортных средств.

Начальник лаборатории методологии
нормирования выбросов в атмосферу,
заместитель начальника отдела
методических основ нормирования
и установления технических нормативов
выбросов, к.г.н.



Н.С. Буренин

Научный сотрудник
лаборатории методологии
нормирования выбросов в атмосферу



В.С. Панфилов

Ведущий инженер
лаборатории методологии
нормирования выбросов в атмосферу



И.Н. Нахимовская

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России по научной работе, доктор политических наук, кандидат исторических наук

« 20 » сентября 2016 г. Т.В. Мусиенко

АКТ

о внедрении результатов исследования, полученных в диссертации Н.В. Невмержицкого на тему: «Методика оценки и прогнозирования экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$ » по специальности 05.26.02 – безопасность в чрезвычайных ситуациях (транспорт) в учебный процесс Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России.

Комиссия в составе:

председателя:

начальника кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, кандидата технических наук, доцента, полковника внутренней службы Марченко Михаила Анатольевича;

членов комиссии:

заместителя начальника кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, кандидата технических наук, доцента, полковника внутренней службы Королевой Людмилы Анатольевны;

профессора кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, доктора технических наук, профессора Ложкина Владимира Николаевича;

доцента кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, кандидата педагогических наук, доцента, подполковника внутренней службы Ивановой Елены Сергеевны;

доцента кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, кандидата технических наук, полковника внутренней службы Филановского Александра Марковича настоящим

подтверждает, что результаты диссертационного исследования Невмержицкого Николая Владимировича на тему «Методика оценки и прогнозирования экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$ » внедрены в учебный процесс кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, а именно:

1. Результаты исследования концентрационного и дисперсного состава взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ вблизи ряда автомагистралей Санкт-Петербурга при разных погодных условиях; результаты исследования влияния гидрометеорологических параметров (влажности, температуры воздуха, скорости ветра) и интенсивности движения на уровень загрязнения воздуха взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$ методом корреляционно-регрессионного анализа.

2. Расчетная методика для прогнозирования и мониторинга экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$ с оценкой вклада сажевых частиц, продуктов износа шин, тормозных колодок, дорожного полотна и вторичной взвеси; обоснование физической модели переноса ВЧ в окрестностях автомагистралей.

3. Результаты численных исследований загрязнения придорожного воздуха PM_{10} и $PM_{2.5}$ с использованием разработанной методики, определение условий опасно высокого уровня загрязнения придорожной воздушной среды мелкодисперсными взвешенными частицами с идентификацией вклада разных источников.

Результат 3 внедрен в тему 1 «Введение. Техносфера Земли. Классификация технических систем. Виды и факторы техногенного риска», «Надежность технических систем и техногенный риск» (специальность 20.05.01 - «Пожарная безопасность»).

Результаты 2 внедрены в тему 10 «Нормирование и контроль показателей безопасности при производстве и эксплуатации автомобилей (в частности, пожарных)» дисциплины «Надежность технических систем и техногенный риск» (специальность 20.05.01 - «Пожарная безопасность»).

Результаты 1, 2, 3 внедрены в тему 5 «Классификация чрезвычайных ситуаций, аварий и катастроф. Причины возникновения и прогнозирование

чрезвычайных ситуаций в техносфере, на промышленных предприятиях и транспорте» дисциплины «Надежность технических систем и техногенный риск» (специальность 20.05.01 - «Пожарная безопасность»).

Председатель комиссии:

Кандидат технических наук, доцент,
полковник внутренней службы



М.А. Марченко

Члены комиссии:

доктор технических наук,
профессор



В.Н. Ложкин

кандидат технических наук, доцент,
полковник внутренней службы



Л.А. Королева

кандидат педагогических наук, доцент,
подполковник внутренней службы



Е.С. Иванова

кандидат технических наук,
полковник внутренней службы



А.М. Филановский

«19» сентября 2016 г.