



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Сезонная изменчивость концентрации загрязняющих веществ в
воздухе Всеволожского района ЛО»

Исполнитель Хорозов Глеб Петрович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Крюкова Светлана Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

«04» июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

Введение	3
1. Загрязнение атмосферы	6
1.1 Структурно-физическая характеристика земной атмосферы.....	6
1.2 Антропогенное и природное загрязнение атмосферы: источники и воздействие	12
1.3 Регламентация загрязняющих веществ в атмосферном воздухе	21
1.4 Метеорологические характеристики, влияющие на концентрацию загрязняющих веществ в атмосферном воздухе	23
2. Экологический мониторинг в Ленинградской области	31
2.1 Автоматическая система мониторинга атмосферного воздуха в Ленинградской области	31
2.2 Станции контроля загрязнения атмосферного воздуха в Ленинградской области	33
3. Анализ сезонной изменчивости загрязнения воздуха в Всеволожском районе Ленинградской области.	36
3.1 Общегеографическая и климатическая характеристика Всеволожского района Ленинградской области.	36
3.2 Анализ концентраций загрязняющих веществ	37
3.4 Анализ влияния метеорологических параметров на загрязнение воздуха	55
Заключение	76
Список литературы	78
Приложение	80

Введение

Современные тенденции глобального экономического развития характеризуются интенсификацией производственных процессов и масштабным расширением транспортных сетей, что оказывает существенное воздействие на экологическое состояние окружающей среды. Наиболее выраженные негативные последствия наблюдаются в развивающихся странах, где стремительный рост промышленного сектора сопровождается активным вводом новых производственных мощностей.

Увеличение объема выбросов загрязняющих веществ в атмосферу приводит к нарушению экологического баланса, особенно в промышленно развитых регионах, что может спровоцировать долгосрочные климатические изменения. В данном контексте особую актуальность приобретают исследования, направленные на оценку степени загрязнения атмосферного воздуха и земной поверхности, вызванного пассивными и активными аэрозольными выбросами. Ключевыми аспектами таких исследований являются определение интенсивности и уровня загрязнения воздушной и водной сред, а также анализ их влияния на биологические системы, включая растительный и животный мир.

Основным фактором, способствующим ухудшению качества воздушного бассейна, является поступление в атмосферу физических, химических и биологических агентов, концентрация которых превышает естественный фоновый уровень. Данный процесс обусловлен как антропогенной деятельностью, так и естественными природными явлениями, однако именно техногенные источники играют доминирующую роль в формировании экологических рисков.

Исследование экологического состояния атмосферного воздуха во Всеволожском районе Ленинградской области является крайне актуальным в современных условиях, когда антропогенное воздействие на окружающую среду достигает критических масштабов. Рост промышленного производства,

увеличение транспортных потоков и интенсивное использование природных ресурсов приводят к значительному ухудшению качества воздуха, что негативно сказывается на здоровье населения и устойчивости экосистем.

Особую значимость работа приобретает в контексте глобальных климатических изменений и ужесточения экологических норм. Всеволожский район, будучи частью промышленно развитой Ленинградской области, подвержен влиянию выбросов от предприятий, транспортных магистралей и других источников загрязнения. Проведённый анализ сезонной динамики концентраций загрязняющих веществ (CO , NO_2 , O_3 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, SO_2) и их зависимости от метеорологических факторов позволяет выявить ключевые закономерности и разработать рекомендации для снижения негативного воздействия.

Кроме того, результаты исследования могут быть использованы для совершенствования системы экологического мониторинга в регионе и прогнозирования экологической обстановки с учётом климатических изменений.

Цель работы: оценка экологического состояния атмосферного воздуха на территории Всеволожского района Ленинградской области.

Задачи исследования:

1) Сбор и систематизация данных среднесуточных концентраций загрязняющих веществ и метеорологических параметров.

2) Визуализация временного распределения концентраций загрязняющих веществ за анализируемые периоды.

3) Расчет и анализ среднемесячной динамики концентраций загрязняющих веществ.

4) Интерпретация графиков пространственно-временного распределения загрязнений.

5) Сравнительная оценка годовой динамики концентраций загрязняющих веществ в изучаемом районе.

6)Исследование корреляции между метеорологическими факторами и уровнем загрязнения атмосферного воздуха.

7)Обобщение результатов и формулировка выводов на основе проведенного анализа.

Объектом исследования выступают данные стационарного экологического мониторинга атмосферного воздуха, полученные с поста наблюдений, расположенного по адресу: г. Мурино, ул. Оборонная, д. 36. Предметом исследования являются измеренные концентрации загрязняющих веществ (CO, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂) за период с конца декабря 2022 года по конец декабря 2023 года.

Структура выпускной квалификационной работы включает введение, три основные главы с подразделами, заключение, список использованных источников и приложения. Первая глава содержит теоретический анализ состава атмосферного воздуха, характеристику основных загрязняющих веществ и принципов нормирования их концентраций. Во второй главе рассматриваются методологические основы организации экологического мониторинга. Третья глава представляет практическую часть исследования, посвященную комплексной оценке экологической обстановки во Всеволожском районе на основе анализа полученных данных мониторинга. В заключительной части работы сформулированы основные выводы, отражающие результаты проведенного исследования.

1. Загрязнение атмосферы

1.1 Структурно-физическая характеристика земной атмосферы

Атмосфера Земли представляет собой газопылевую оболочку планетарного масштаба, с общей массой порядка 5.157×10^{15} тонн. Данная система является многокомпонентной гетерогенной средой, состоящей из:

- постоянных газовых составляющих (N_2 , O_2 , Ar, CO_2)
- переменных компонентов (H_2O в парообразном состоянии)
- дисперсных аэрозольных включений

Вертикальная стратификация атмосферы демонстрирует четко выраженную слоистую структуру, обусловленную градиентами термодинамических параметров. Основные структурные элементы включают:

1. Тропосфера, представляющая собой нижний слой атмосферы Земли (простирающийся в средних широтах на высоту 0-15 км с вариациями от 8 км в полярных до 18 км в экваториальных регионах), играет ключевую роль в формировании погодных и климатических условий. Этот слой содержит около 75-80% всей массы атмосферы и более 99% атмосферного водяного пара, что определяет его важнейшие климатообразующие функции. Для тропосферы характерен выраженный вертикальный температурный градиент, составляющий в среднем $6,5^\circ C$ на 1 км высоты. Основными динамическими процессами в тропосфере являются квазигоризонтальные воздушные течения (адвекция), развитая система циркуляционных ячеек (Хэдли, Ферреля, полярных) и интенсивная турбулентная диффузия.

К важнейшим функциям тропосферы относятся формирование метеорологических процессов, обеспечение тепло- и влагообмена между земной поверхностью и атмосферой, генерация облачных систем и осадков, а также транспорт аэрозольных компонентов. Физические процессы в тропосфере обусловлены комплексом факторов, включая радиационный

баланс, конвективные потоки, фазовые переходы воды и орографические воздействия. Именно в этом слое реализуются основные механизмы формирования как краткосрочных погодных условий, так и долгосрочных климатических изменений, что делает тропосферу важнейшим объектом исследований в современной метеорологии и климатологии. Особенности вертикального строения и динамики тропосферы определяют пространственно-временное распределение основных метеорологических параметров и загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы.

2. Стратосфера, простирающаяся от тропопаузы (на высотах 10-15 км) до 40-50 км, представляет собой важнейший слой атмосферы, отделённый от тропосферы переходным слоем с минимальными температурными колебаниями. Этот атмосферный регион характеризуется уникальными физико-химическими свойствами: здесь наблюдается положительный температурный градиент (от -60°C у нижней границы до 0°C у верхней), что обусловлено особенностями радиационного баланса[11]. Наибольший научный интерес представляет озоновый слой, достигающий максимальной концентрации на высотах 20-30 км и содержащий около 90% всего атмосферного озона (O_3).

Главной функцией стратосферы является обеспечение радиационной защиты биосферы. Озоновый слой эффективно поглощает жесткое ультрафиолетовое излучение (200-300 нм), преобразуя его энергию в тепловую, что и вызывает характерное повышение температуры с высотой. Этот механизм создаёт естественный щит, защищающий земные организмы от опасного воздействия УФ-излучения, способного вызывать повреждения ДНК, мутагенные эффекты и нарушения фотосинтетической активности.

Динамика стратосферы отличается от тропосферной: здесь наблюдается слабая турбулентность и вертикальная перемешиваемость, преобладают горизонтальные воздушные течения и формируются квазистационарные вихревые структуры. Современные исследования выявляют значительную пространственно-временную изменчивость

стратосферного озона, особенно выраженную в полярных регионах, где наблюдаются сезонные явления "озоновых дыр"

Мезосфера, простирающаяся от стратопавзы (40-50 км) до мезопавзы (80-90 км), представляет собой уникальный атмосферный слой с выраженными термодинамическими и оптическими особенностями. Для этого слоя характерен отрицательный температурный градиент - от 0°C у нижней границы до экстремально низких значений около -90°C на мезопавзе, где наблюдаются минимальные температуры в атмосфере (до -100°C). Плотность воздуха здесь резко снижается, достигая значений порядка 10^{-3} г/м³, что создаёт особые условия для физико-химических процессов.

Одной из наиболее характерных особенностей мезосферы являются аэрозольные образования, в частности мезосферные (ночные светящиеся) облака. Эти облачные структуры состоят из кристаллов водяного льда размером 10-100 нм, метеорной пыли, выступающей в качестве ядер конденсации, и ионизированных частиц. Оптические явления в мезосфере включают феномен полярных мезосферных облаков, их свечение в видимом диапазоне за счёт рассеяния солнечного света, что делает их особенно хорошо наблюдаемыми в сумеречный период.

Физические процессы в мезосфере отличаются сложностью и включают многообразные механизмы теплообмена (радиационный, молекулярный и турбулентный), фотохимические реакции с участием гидроксильных радикалов, процессы атмосферно-метеорного взаимодействия, а также формирование натриевого слоя на высотах 80-105 км. Особый научный интерес представляют серебристые облака, которые служат важными индикаторами климатических изменений в верхней атмосфере, космическо-атмосферных взаимодействий и трансграничного переноса вещества.

4. Ионосфера (60-1000 км) представляет собой верхний слой атмосферы с высокой степенью ионизации частиц. Этот слой начинается на высоте около 60 км и простирается до 1000 км, постепенно переходя в

магнитосферу. Основной особенностью ионосферы является наличие значительного количества свободных электронов и ионов, образующихся под воздействием солнечного излучения.

Температура в ионосфере возрастает с высотой от -70°C в нижних слоях до $+1500^{\circ}\text{C}$ в верхних. Такое повышение температуры связано с поглощением ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца. Плотность газа здесь крайне низкая - в сотни раз меньше, чем у поверхности Земли.

Ионосфера состоит из нескольких слоёв (D, E, F1 и F2), каждый из которых отличается степенью ионизации и высотой расположения. Наиболее плотный ионизированный слой F2 находится на высоте 250-400 км. Концентрация заряженных частиц здесь достигает миллиона на кубический сантиметр.

Главная функция ионосферы - отражение радиоволн, что позволяет осуществлять дальнюю радиосвязь. Также она защищает Землю от вредного космического излучения. Состояние ионосферы сильно зависит от солнечной активности - в периоды вспышек на Солнце в ней происходят возмущения, влияющие на радиосвязь.

В ионосфере наблюдаются такие явления, как полярные сияния, ионосферные бури и спорадические слои E. Эти процессы активно изучаются, так как они влияют на работу спутников, систем навигации и связи.

5. Экзосфера представляет собой самый верхний и наиболее разреженный слой земной атмосферы, начинающийся на высоте около 600 километров и постепенно переходящий в космическое пространство. Этот внешний атмосферный слой простирается до высоты приблизительно 10 000 километров, где частицы газа окончательно преодолевают земное притяжение.

Граница экзосферы не является фиксированной и варьируется в зависимости от уровня солнечной активности. В периоды минимальной солнечной активности нижняя граница может опускаться до 500 километров, тогда как во время солнечного максимума поднимается до 1000 километров. Эти колебания вызваны изменениями температуры и плотности нижележащих атмосферных слоев.

Характерной особенностью экзосферы является чрезвычайно низкая плотность частиц, составляющая менее одного миллиона на кубический сантиметр. В этом слое преобладают самые легкие газы - атомарный водород и гелий, которые движутся по баллистическим траекториям, практически не сталкиваясь друг с другом. Средняя длина свободного пробега частиц здесь значительно превышает вертикальный масштаб самого слоя.

Среди ключевых процессов, происходящих в экзосфере, следует отметить формирование протяженной водородной короны вокруг Земли, постоянную утечку атмосферных частиц в межпланетное пространство, а также взаимодействие с заряженными частицами солнечного ветра, которое приводит к возникновению полярных сияний в нижележащих слоях атмосферы.

Экзосфера демонстрирует высокую чувствительность к изменениям солнечной активности, что проявляется в вариациях степени ионизации, химического состава и термического состояния этого слоя. Данный регион атмосферы играет важную роль в процессах планетарного масштаба, включая регулирование потерь атмосферной массы, взаимодействие с космической средой, формирование магнитосферных структур и поддержание радиационного баланса планеты. Таким образом, экзосфера служит переходной зоной между земной атмосферой и космическим пространством, где постепенно прекращается влияние земного притяжения и начинается область доминирования солнечного ветра.

Газовый состав атмосферы Земли: структура и вариабельность компонентов

Атмосферный воздух представляет собой сложную многокомпонентную систему, в которой все вещества можно разделить на две основные категории по критерию устойчивости их концентрации. Первую группу составляют постоянные компоненты, включающие азот (N_2) с объемной долей около 78%, кислород (O_2) - приблизительно 21%, аргон (Ar) - 0,93% и углекислый газ (CO_2) - 0,04%. Эти газы образуют основу атмосферы и отличаются относительным постоянством своего содержания в приземном слое.

Ко второй категории относятся переменные составляющие, которые подразделяются на природные (естественного происхождения) и антропогенные (связанные с человеческой деятельностью). Среди второстепенных постоянных компонентов следует отметить инертные газы: неон (Ne), гелий (He) и криптон (Kr), суммарное содержание которых не превышает 0,002%, а также метан (CH_4) с концентрацией порядка 0,0002%. Особое положение занимает водяной пар (H_2O), содержание которого значительно варьирует в зависимости от географического положения и метеорологических условий.

Важную роль в атмосферных процессах играют такие переменные компоненты как оксиды азота (NO_x), озон (O_3) и различные аэрозольные частицы. Эти вещества, несмотря на их незначительные концентрации, оказывают существенное влияние на радиационный баланс планеты, формирование погодных условий и климатические изменения. Следует отметить, что количественное соотношение атмосферных компонентов не является абсолютно постоянным - оно изменяется как в пространстве (в зависимости от высоты над уровнем моря и географической широты), так и во времени (под влиянием сезонных факторов и антропогенного воздействия). Особенно это касается таких компонентов как углекислый газ и метан, концентрация которых в последние десятилетия демонстрирует устойчивую тенденцию к росту.

1.2 Антропогенное и природное загрязнение атмосферы: источники и воздействие

Атмосферное загрязнение представляет собой процесс модификации газового состава и физико-химических свойств воздушной среды вследствие поступления чрезмерного количества загрязняющих веществ различной природы. К ним относятся газообразные соединения, аэрозольные частицы и биологические агенты, оказывающие негативное влияние на биологические системы разного уровня организации.

Источники загрязнения атмосферного воздуха классифицируются на две основные группы: природные (естественные) и антропогенные (техногенные). Каждая из этих групп включает различные типы загрязнителей, оказывающих специфическое воздействие на состав и качество атмосферы.

К природным источникам загрязнения относятся процессы естественного происхождения. Эоловые процессы, связанные с ветровой эрозией почв, приводят к поступлению в атмосферу значительного количества твердых частиц. Пирогенные факторы включают природные пожары, которые выделяют в атмосферу продукты горения. Вулканическая деятельность сопровождается мощными выбросами газов и вулканического пепла. Атмосферно-пылевые явления, такие как пылевые бури, способствуют дальнему переносу аэрозольных частиц. Биодеструкционные процессы разложения органики также вносят вклад в загрязнение воздуха. Отдельную группу составляют космогенные факторы - метеоритное вещество и космическая пыль, постоянно поступающие в атмосферу.

Антропогенные источники загрязнения связаны с хозяйственной деятельностью человека. Промышленные эмиссии от металлургических, энергетических и нефтехимических предприятий являются значимыми источниками загрязнения. Агропромышленный сектор вносит свой вклад через выбросы животноводческих комплексов и птицефабрик. Транспортная

система генерирует огромное количество выхлопных газов. Коммунально-бытовые источники, включая печное отопление и сжигание биомассы, также ухудшают качество воздуха.

По характеру загрязняющих веществ выделяют три основные категории. Химические загрязнители включают газообразные соединения, тяжелые металлы и органические вещества. Физические факторы представлены радиоактивными элементами и тепловым загрязнением. Биологические компоненты включают аллергены, микроорганизмы и споры растений.

Особую проблему представляет комбинированное воздействие различных загрязнителей. Синергетический эффект приводит к серьезным последствиям: ухудшению качества воздуха, нарушению природных биохимических циклов, образованию фотохимического смога, выпадению кислотных осадков и усилению парникового эффекта. Эти явления оказывают комплексное негативное воздействие на экосистемы и здоровье человека.

Современные исследования демонстрируют, что антропогенная составляющая в общем балансе атмосферных загрязнений неуклонно возрастает, что требует разработки эффективных систем мониторинга и контроля качества воздушной среды.

Химические загрязнители атмосферы представляют собой обширную группу опасных соединений, включающих как природные, так и синтетические вещества, оказывающие негативное воздействие на окружающую среду. Среди наиболее распространенных загрязнителей выделяются оксиды углерода (CO и CO_2), диоксид серы (SO_2), различные оксиды азота (NO_x), тропосферный озон (O_3), летучие органические соединения, аммиак (NH_3) и тяжелые металлы, такие как свинец, кадмий, ртуть и мышьяк. Особую опасность представляют синтетические соединения, в частности хлорфторуглероды (фреоны), которые ранее широко использовались в промышленных и бытовых целях, включая холодильное

оборудование, системы кондиционирования воздуха и аэрозольные продукты[1].

Механизм разрушения озонового слоя этими соединениями связан с их способностью высвобождать атомарный хлор при воздействии ультрафиолетового излучения в стратосфере. Высвободившиеся атомы хлора вступают в каталитическую реакцию с молекулами озона (O_3), приводя к их расщеплению на молекулярный кислород (O_2). Этот процесс вызывает постепенное истощение озонового слоя, что проявляется в образовании так называемых "озоновых дыр" - участков с аномально низкой концентрацией озона. Последствия разрушения озонового слоя имеют глобальный характер и включают усиление потока вредного ультрафиолетового излучения, достигающего поверхности Земли, что представляет серьезную угрозу для всех живых организмов.

Воздействие химических загрязнителей на атмосферу не ограничивается только разрушением озонового слоя. Эти вещества также способствуют изменению климатических условий на планете, влияя на тепловой баланс и циркуляцию воздушных масс. Например, некоторые соединения обладают выраженным парниковым эффектом, способствуя глобальному потеплению, в то время как другие могут изменять химический состав атмосферных осадков, приводя к образованию кислотных дождей. Комплексное воздействие этих факторов приводит к серьезным нарушениям в функционировании экосистем, влияет на здоровье человека и животных, а также вызывает негативные изменения в растительном мире. В связи с этим проблема химического загрязнения атмосферы требует постоянного мониторинга и разработки эффективных мер по снижению выбросов опасных соединений в окружающую среду.

Физические загрязнители представляют собой разнородную группу материальных объектов и физических полей, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. К ним относятся прежде всего твердые взвешенные частицы, такие как сажа - продукт неполного сгорания

углеводородного топлива, пепел, образующийся при сжигании органических материалов, и пыль минерального происхождения. Эти аэрозольные компоненты существенно ухудшают качество атмосферного воздуха, снижая его прозрачность и изменяя радиационный баланс. Особую категорию составляют энергетические загрязнители, включающие шумовое воздействие от промышленных предприятий и транспортных средств, тепловое загрязнение в виде выбросов перегретого пара и газов, а также электромагнитное излучение в широком диапазоне частот, включая радиоволны.

Механизм воздействия этих загрязнителей на окружающую среду носит комплексный характер. Твердые частицы, обладая высокой дисперсностью, длительное время сохраняются в атмосфере, формируя устойчивые аэрозольные облака. Акустическое загрязнение приводит к нарушению естественного звукового фона, что особенно заметно в урбанизированных территориях. Тепловые выбросы изменяют локальный микроклимат, создавая так называемые "острова тепла". Электромагнитное излучение, в свою очередь, может влиять на работу чувствительного электронного оборудования и, по некоторым данным, на биологические объекты.

Экологические последствия физического загрязнения проявляются в различных аспектах. Во-первых, происходит изменение оптических характеристик атмосферы, что ведет к снижению видимости и модификации светового режима. Во-вторых, нарушается тепловой баланс в приземном слое воздуха, что может влиять на локальные метеорологические процессы. В-третьих, отмечается негативное воздействие на здоровье человека, особенно в случае длительного воздействия мелкодисперсных частиц или интенсивного шума. Кроме того, физические загрязнители могут оказывать косвенное влияние на климатические изменения, участвуя в сложных процессах взаимодействия между различными компонентами природной среды.

Мониторинг физических загрязнителей требует применения специализированных методов и оборудования. Для измерения концентрации твердых частиц используются аэрозольные спектрометры и гравиметрические методы. Шумовое загрязнение оценивается с помощью шумомеров, а тепловые аномалии фиксируются при помощи тепловизоров и инфракрасной съемки. Контроль электромагнитного фона осуществляется с использованием спектроанализаторов и других радиотехнических устройств. Полученные данные позволяют не только оценивать текущее состояние окружающей среды, но и разрабатывать эффективные меры по снижению негативного воздействия физических загрязнителей.

Биологическое загрязнение атмосферного воздуха представляет собой процесс поступления в воздушную среду живых микроорганизмов и биологически активных веществ, оказывающих негативное воздействие на экосистемы и здоровье человека. К основным компонентам данного типа загрязнения относятся патогенные вирусы, болезнетворные бактерии, аллергенные споры грибов и фитотоксины, продуцируемые растениями. Особенностью биологических загрязнителей является их способность к активному размножению и распространению в благоприятных условиях, что значительно повышает их потенциальную опасность.

Процесс поступления биологических агентов в атмосферу связан с естественными биологическими циклами и может интенсифицироваться под влиянием антропогенных факторов. Наибольшая концентрация биозагрязнителей обычно наблюдается в приземном слое атмосферы и носит выраженный локальный характер, будучи привязанной к конкретным источникам эмиссии. Распространение таких загрязнителей в пространстве зависит от комплекса метеорологических условий, включая температуру воздуха, относительную влажность, скорость и направление ветра.

Следует отметить, что биологическое загрязнение атмосферы обладает рядом специфических особенностей, отличающих его от химического и физического типов загрязнения. Во-первых, биологические агенты способны

к самовоспроизводству и адаптации к условиям окружающей среды. Во-вторых, их воздействие часто имеет кумулятивный характер и проявляется через определенный латентный период. В-третьих, эффект от биологического загрязнения может усиливаться за счет синергетического взаимодействия различных видов микроорганизмов. Все эти факторы необходимо учитывать при разработке систем мониторинга и методов контроля биологического загрязнения атмосферного воздуха.

Основные загрязняющие вещества: CO, CO₂, SO₂, NO_x, углеводороды.

Оксид углерода (CO) представляет собой химическое соединение, характеризующееся отсутствием цветовой окраски и запаха. Данное вещество образуется преимущественно в процессе неполного окисления углеводородных топливных материалов (каменного угля, природного газа, нефтепродуктов) в условиях ограниченного доступа кислорода и при относительно низких температурных режимах горения. С экологической точки зрения, данный газ относится к категории значимых парниковых агентов, чье присутствие в атмосфере способствует интенсификации парникового эффекта глобального масштаба.

Физико-химические свойства монооксида углерода обуславливают его высокую стабильность в атмосферных условиях и способность к длительному переносу воздушными массами. Механизм парникового действия CO связан с его влиянием на химические процессы в атмосфере, в частности - с изменением концентрации гидроксильных радикалов, что косвенно влияет на содержание других парниковых газов, таких как метан. Особенностью данного соединения является его способность взаимодействовать с гемоглобином крови, образуя карбоксигемоглобин, что определяет его высокую токсичность для живых организмов.

Двуокись углерода (CO₂) представляет собой химическое соединение, относящееся к классу оксидов, которое характеризуется отсутствием видимой окраски, но обладает слабокислым вкусом и слабовыраженным запахом. Данное вещество образуется в результате процессов полного

окисления углеродсодержащих соединений при наличии достаточного количества кислорода и оптимальных температурных условий. С точки зрения экологической химии, диоксид углерода относится к числу важнейших парниковых газов, играющих ключевую роль в формировании теплового баланса планеты.

Физико-химические свойства CO_2 обуславливают его значительную устойчивость в атмосфере и способность активно поглощать инфракрасное излучение в диапазоне 12-18 мкм. Это поглощение приводит к задержке тепловой энергии в приземных слоях атмосферы, что составляет основу парникового эффекта. Особенностью данного газа является его участие в глобальном углеродном цикле, включающем процессы фотосинтеза, дыхания организмов, растворения в гидросфере и геохимические превращения.

Современные исследования подчеркивают ключевую роль CO_2 как доминирующего фактора антропогенного изменения климата, на долю которого приходится около 76% общего радиационного воздействия парниковых газов. Мониторинг концентрации диоксида углерода в атмосфере, проводимый глобальной сетью наблюдательных станций, демонстрирует устойчивый рост его содержания с доиндустриального уровня 280 ppm до современных значений, превышающих 420 ppm [2].

Диоксид серы (SO_2) представляет собой важный атмосферный загрязнитель, образующийся преимущественно в результате термохимических процессов окисления серосодержащих соединений при высокотемпературной обработке минерального сырья и сжигании ископаемых топлив. Основными источниками его поступления в атмосферу выступают энергетические установки, работающие на высокосернистых углях и мазутах, а также металлургические предприятия, осуществляющие переработку сульфидных руд цветных металлов. В атмосфере данный газ претерпевает ряд сложных химических превращений, включая фотохимическое окисление до триоксида серы (SO_3) и последующее взаимодействие с атмосферной влагой с образованием серной кислоты

(H_2SO_4), что является ключевым звеном в цепи процессов, приводящих к выпадению кислотных осадков. Эти реакции протекают как в газовой фазе, так и на поверхности аэрозольных частиц, причем скорость превращений существенно зависит от метеорологических условий, включая влажность воздуха, интенсивность солнечной радиации и наличие каталитических примесей. Образующиеся в результате сульфатные аэрозоли обладают выраженной гигроскопичностью и служат ядрами конденсации атмосферной влаги, способствуя формированию облаков с пониженным значением pH. Длительное воздействие таких осадков приводит к существенным изменениям в химическом составе почв и поверхностных вод, вызывая выщелачивание важных питательных элементов и мобилизацию токсичных металлов, что в совокупности вызывает деградацию наземных и водных экосистем. Кроме того, присутствие SO_2 в приземном слое атмосферы оказывает непосредственное негативное воздействие на здоровье человека, особенно на дыхательную систему, а также способствует ускоренной коррозии строительных материалов и конструкций.

Оксиды азота (NO_x), включающие преимущественно монооксид азота (NO) и диоксид азота (NO_2), представляют собой высокореактивные газообразные соединения, образующиеся в результате термохимических процессов при высокотемпературном окислении азота. Основными источниками их поступления в атмосферу являются процессы горения органического топлива в условиях повышенных температур (выше 1200°C) и избытка кислорода, где происходит окисление как молекулярного азота атмосферы, так и азотсодержащих компонентов самого топлива. Значительные объемы выбросов NO_x связаны с деятельностью химических предприятий, в частности производящих азотные удобрения (аммиачную селитру, карбамид), азотную кислоту (по нитратному методу), анилиновые красители и различные нитросоединения. Механизм образования данных соединений включает три основных пути: термический (доминирующий при температурах выше 1500°C), быстрое окисление (в диапазоне $900\text{--}1200^\circ\text{C}$) и

топливный (связанный с окислением азотистых соединений в составе топлива). В атмосфере оксиды азота проявляют высокую химическую активность, участвуя в сложных фотохимических реакциях, приводящих к образованию вторичных загрязнителей - тропосферного озона, пероксиацилнитратов и нитратных аэрозолей, которые являются основными компонентами фотохимического смога. Экологическое воздействие NO_x проявляется в нескольких аспектах: они оказывают раздражающее действие на органы дыхания человека, способствуют повреждению растительности, ускоряют коррозионные процессы строительных материалов и металлических конструкций, а также участвуют в формировании парникового эффекта. Кроме того, взаимодействуя с атмосферной влагой, оксиды азота образуют азотистую и азотную кислоты, являющиеся компонентами кислотных осадков.

Углеводороды представляют собой обширный класс органических соединений, молекулярная структура которых состоит исключительно из атомов углерода и водорода. Данная группа включает несколько тысяч индивидуальных веществ, различающихся по строению углеродного скелета (алифатические, ароматические, циклические) и степени насыщенности (алканы, алкены, алкины, арены). В контексте атмосферного загрязнения наибольшую экологическую значимость имеют летучие органические соединения (ЛОС), которые поступают в атмосферу из различных антропогенных источников: неполного сгорания моторного топлива в двигателях внутреннего сгорания (особенно бензиновых), испарения нефтепродуктов, использования органических растворителей в промышленных процессах и бытовой химии, а также операций химической чистки.

Особенностью атмосферных углеводородов является их высокая химическая активность в фотохимических реакциях, где они выступают ключевыми участниками процессов образования вторичных загрязнителей - тропосферного озона, пероксиацилнитратов и других компонентов

фотохимического смога. Метаболическая активность многих углеводов в живых организмах крайне низка, что обуславливает их способность к биоаккумуляции и потенциальную токсичность.

Классификация городских загрязнителей подробно рассмотрена в монографии[12].

1.3 Регламентация загрязняющих веществ в атмосферном воздухе

Регулирование концентраций вредных веществ в атмосфере представляет собой ключевой механизм защиты экосистем и сохранения здоровья населения. Основным инструментом такого регулирования служит система предельно допустимых концентраций (ПДК), определяющая максимально разрешенные уровни содержания загрязнителей в воздушной среде.

ПДК представляет собой научно обоснованный норматив, гарантирующий отсутствие вредного влияния на организм человека и природные объекты при постоянном или кратковременном воздействии. Разработка этих нормативов базируется на данных токсикологических исследований, клинических наблюдений, экологического мониторинга и закрепляется законодательными актами.

Система нормирования охватывает обширный перечень опасных соединений, включая высокотоксичные химикаты, тяжелые металлы, газообразные выбросы, летучие органические соединения и взвешенные частицы. Для каждого вещества нормативы устанавливаются индивидуально с учетом степени его опасности, характера воздействия (острого или хронического), а также способности накапливаться в окружающей среде.

Контроль соблюдения установленных нормативов возложен на специализированные надзорные органы, осуществляющие систематический мониторинг качества атмосферного воздуха. В их функции входит отбор

проб, лабораторный анализ и принятие мер при обнаружении превышений допустимых концентраций.

Основная цель нормирования заключается в снижении антропогенной нагрузки на окружающую среду, предотвращении ущерба здоровью населения и создании условий для устойчивого экологического развития. Особое внимание уделяется защите уязвимых групп населения и чувствительных экосистем от вредного воздействия загрязнителей.

Классификация ПДК для атмосферного воздуха

1. Среднесуточная предельно допустимая концентрация (ПДК_{сс}) - определяет безопасный уровень постоянного воздействия в течение неограниченного времени. Данный норматив гарантирует отсутствие отдаленных последствий для здоровья настоящего и будущих поколений.

2. Максимально разовая предельно допустимая концентрация (ПДК_{мр}) - устанавливает предельно допустимый уровень при кратковременном (20-30 минут) воздействии. Этот норматив предотвращает возникновение рефлекторных реакций и раздражающего эффекта у человека.

Современные гигиенические требования к качеству атмосферного воздуха населенных пунктов регламентируются санитарными правилами СанПиН 1.2.3685-21, утвержденными постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 года № 2. Данный нормативный документ устанавливает следующие предельные значения концентраций основных загрязняющих веществ:

1. Среднесуточные предельно допустимые концентрации (ПДК_{сс}):

-Диоксид азота (NO₂) - 0,1 мг/м³ (токсичный газ, образующийся при высокотемпературных процессах горения)

-Взвешенные частицы PM₁₀ - 0,06 мг/м³ (аэродинамический диаметр ≤10 мкм, включающие пыль, сажу, пыльцу растений)

-Взвешенные частицы PM_{2,5} - 0,035 мг/м³ (ультрадисперсная фракция ≤2,5 мкм, наиболее опасная для дыхательной системы)

-Диоксид серы (SO_2) - 0,05 мг/м³ (продукт сжигания серосодержащего топлива)

-Озон (O_3) - 0,1 мг/м³ (средняя за 8 часов, вторичный загрязнитель, образующийся в результате фотохимических реакций)

-Оксид углерода (CO) - 3,0 мг/м³ (продукт неполного сгорания органического топлива)

2. Максимальные разовые концентрации (ПДК_{мр}):

Определяются как предельные значения, при которых отсутствуют:

-Отсутствуют рефлекторные реакции организма (кашель, слезотечение, изменение световой чувствительности глаз)

-Не проявляется раздражающее действие на органы чувств (обоняние, зрение)

-Исключается отрицательное влияние на организм человека при кратковременном воздействии

-Сохраняется комфортное самочувствие у чувствительных групп населения

1.4 Метеорологические характеристики, влияющие на концентрацию загрязняющих веществ в атмосферном воздухе

1) Температурный режим атмосферы является важнейшим климатообразующим фактором, определяющим особенности формирования погодных условий в различных регионах. В условиях урбанизированных территорий наблюдается значительная модификация естественного температурного фона, вызванная антропогенной деятельностью. Наиболее ярким проявлением такого воздействия выступает феномен "городского острова тепла", когда в холодный период года температура в городской застройке может превышать показатели окружающих территорий на 3-5°C. Этот эффект обусловлен совокупностью факторов, включая тепловыделение от систем отопления зданий, аккумуляцию тепла массивными

строительными конструкциями, а также снижение эффективности ночного выхолаживания из-за особенностей городской планировки.

В летний период температурный режим городской среды также претерпевает существенные изменения. Асфальтобетонные покрытия и каменные конструкции, обладая высокой теплоемкостью, активно аккумулируют солнечную радиацию, что приводит к формированию устойчивых зон перегрева. Температурный контраст между центральными районами города и периферией может достигать 7-10°C, причем ситуация усугубляется сокращением площади зеленых насаждений и водных объектов, которые в естественных условиях выполняют терморегулирующую функцию.

Повышение температуры воздуха в городской среде имеет прямую корреляцию с уровнем атмосферного загрязнения. Эта взаимосвязь обусловлена несколькими механизмами: интенсификацией процессов испарения летучих органических соединений, активизацией фотохимических реакций с образованием вторичных загрязнителей, а также увеличением выбросов от промышленных предприятий и транспортных средств. Особенно ярко эти процессы проявляются в летний период, когда устойчивые температурные инверсии способствуют накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, приводя к формированию смоговых явлений и росту концентрации опасных для здоровья соединений, таких как приземный озон и фотооксиданты.

2) Скорость ветра оказывает существенное влияние на процессы рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере. При слабых ветрах (1-3 м/с) и особенно в условиях штиля наблюдается значительное накопление вредных примесей в приземном слое воздуха. Это связано с резким снижением турбулентного перемешивания воздушных масс и ограничением как горизонтального, так и вертикального воздухообмена. В таких метеорологических условиях создаются предпосылки для формирования

устойчивых очагов загрязнения, особенно в урбанизированных территориях и промышленных зонах.

Усиление ветрового потока приводит к значительному улучшению качества атмосферного воздуха. При достижении скорости ветра 4-6 м/с отмечается интенсивное рассеивание загрязняющих веществ, что обусловлено несколькими факторами. Во-первых, увеличивается турбулентная диффузия, способствующая равномерному распределению примесей в атмосфере. Во-вторых, усиливается вертикальный воздухообмен, препятствующий накоплению загрязнений у поверхности земли. В-третьих, снижается вероятность образования температурных инверсий, которые являются основной причиной длительного сохранения высоких концентраций вредных веществ.

Однако следует учитывать, что чрезмерно сильные ветры (более 10 м/с) могут вызывать побочные негативные эффекты, такие как вторичное загрязнение за счет подъема пыли с поверхности и переноса загрязняющих веществ из соседних регионов. Ветровой режим в Всеволожском районе характеризуется низкими скоростями, и его очищающий эффект проявляется время от времени.

3) Атмосферные осадки являются важным природным механизмом самоочищения воздушной среды от загрязняющих веществ. Их количественные характеристики, измеряемые в миллиметрах водного слоя, образовавшегося на горизонтальной поверхности, определяют эффективность процессов очищения атмосферы. Интенсивность осадков, их продолжительность и частота выпадения формируют сложную систему воздействия на аэрозольные и газовые примеси, содержащиеся в воздухе.

Процесс очищения атмосферы осадками осуществляется через несколько физико-химических механизмов. Во-первых, происходит вымывание взвешенных частиц различной дисперсности. Во-вторых, наблюдается растворение газообразных соединений в капельной фазе. В-третьих, в облачной среде происходят химические превращения

загрязняющих веществ. Эффективность этих процессов существенно зависит от физических характеристик осадков, включая размер капель и их фазовое состояние, а также от химического состава загрязнений и особенностей вертикальной структуры атмосферы.

Экспериментальные данные свидетельствуют, что заметное снижение концентраций загрязняющих веществ в воздухе начинается при выпадении осадков количеством 5 мм и более за сутки. При таких условиях наблюдается уменьшение концентрации мелкодисперсных аэрозолей (PM_{2.5}) на 40-60%, а содержание газообразных соединений, таких как диоксид серы (SO₂) и оксиды азота (NO_x), снижается на 20-30%. Одновременно происходит уменьшение кислотности осадков за счет эффекта разбавления.

Однако в условиях значительного антропогенного загрязнения атмосферы осадки могут приобретать выраженные кислотные свойства, когда их pH опускается ниже 5.6. Такие "кислотные дожди" оказывают негативное воздействие на окружающую среду, вызывая повреждение растительности, подкисление почв, коррозию строительных материалов и нарушение экологического баланса водных систем. Особенно сильно эти эффекты проявляются в промышленных регионах с высокой концентрацией выбросов серы и азота.

4) Температурные инверсии представляют собой важное метеорологическое явление, характеризующееся аномальным повышением температуры воздуха с высотой в приземном слое атмосферы. Согласно общепринятой классификации, приземные инверсии формируются непосредственно у земной поверхности и наиболее часто возникают в условиях ясной безветренной погоды, когда интенсивное ночное излучение земной поверхности приводит к значительному охлаждению нижних слоев воздуха [3].

С экологической точки зрения температурные инверсии создают серьезные препятствия для нормального рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере. Основное негативное воздействие связано с подавлением

вертикального перемешивания воздушных масс, что приводит к формированию устойчивого приземного слоя с ограниченным объемом. В таких условиях происходит интенсивное накопление вредных примесей от антропогенных источников, что вызывает значительное ухудшение качества воздуха.

Различают два основных типа инверсий, по-разному влияющих на распространение загрязнений. Приземные инверсии наиболее опасны для рассеивания выбросов от низкорасположенных источников (автотранспорт, небольшие котельные), в то время как приподнятые инверсии способствуют накоплению выбросов от высоких промышленных труб. Наибольшая частота инверсионных ситуаций наблюдается в ночные часы (в 3-5 раз чаще, чем днем), в холодный период года и при устойчивых антициклональных условиях погоды.

Разрушение инверсионного слоя обычно происходит при усилении ветра (скорость более 4-5 м/с), поступлении холодных воздушных масс или развитии конвективных процессов. Экологические последствия инверсий проявляются в формировании смоговых ситуаций, росте концентраций загрязняющих веществ в 2-3 раза по сравнению с нормальными условиями и увеличении продолжительности воздействия вредных примесей на население и экосистемы.

5) Туман представляет собой метеорологическое явление, при котором в приземном слое атмосферы образуется устойчивая взвесь микроскопических водяных капель или ледяных кристаллов. Этот процесс возникает при достижении температуры точки росы, когда водяной пар конденсируется на ядрах конденсации, в качестве которых часто выступают аэрозольные частицы антропогенного происхождения. Физические характеристики тумана (размер капель, их концентрация, вертикальная протяженность) определяют его взаимодействие с атмосферными загрязнениями.

С экологической точки зрения туманы играют сложную роль в процессах переноса и трансформации загрязняющих веществ. Капельная фаза тумана активно поглощает газообразные и аэрозольные примеси, что приводит к их химической трансформации и изменению токсических свойств. В условиях промышленных районов туманы часто содержат повышенные концентрации сернистых соединений, оксидов азота, тяжелых металлов и органических загрязнителей, которые в водной среде могут образовывать высокотоксичные соединения.

Наиболее опасными с экологической позиции являются радиационные туманы, формирующиеся в условиях антициклональной погоды при наличии температурной инверсии. В таких ситуациях наблюдается образование устойчивого приземного слоя толщиной 50-200 метров с крайне ограниченным вертикальным перемешиванием. Промышленные выбросы, первоначально расположенные выше слоя тумана, постепенно опускаются и смешиваются с ним, что приводит к резкому (в 5-10 раз) увеличению концентраций загрязняющих веществ у поверхности земли.

Особую опасность представляют следующие процессы, происходящие в тумане: образование серной и азотной кислот при окислении SO_2 и NO_x , аккумуляция тяжелых металлов в капельной фазе, формирование вторичных органических аэрозолей, увеличение времени пребывания загрязнителей в приземном слое.

б) Атмосферное давление является фундаментальным параметром, определяющим характер циркуляционных процессов и стратификации воздушных масс в атмосфере. Пространственное распределение и временная динамика барических полей непосредственно влияют на формирование погодных условий и климатические характеристики региона, а также на процессы рассеивания и трансформации загрязняющих веществ в воздушном бассейне.

Наибольшую экологическую опасность представляют ситуации с устойчивым антициклоном, когда область высокого давления сохраняется в

течение продолжительного периода (3-5 суток и более). В таких условиях наблюдается комплекс неблагоприятных метеорологических явлений: резкое ослабление ветровой активности (до штилевых значений менее 1 м/с), формирование устойчивых температурных инверсий, увеличение повторяемости туманов и дымки, а также уменьшение вертикального температурного градиента. Эти факторы в совокупности создают условия для интенсивного накопления загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы.

Особенно опасны антициклональные условия в теплый период года, когда дополнительно наблюдаются следующие процессы: повышение приземной температуры воздуха на 5-7°C выше климатической нормы, увеличение испарения летучих органических соединений, интенсификация фотохимических реакций в атмосфере. В городских условиях это приводит к образованию фотохимического смога, характеризующегося повышенными концентрациями озона, пероксиацетилнитратов и других вторичных загрязнителей [3].

Наибольший экологический риск возникает при сочетании следующих факторов: высокой интенсивности автомобильных выхлопов, значительных промышленных выхлопов, интенсивной солнечной радиации и ограниченного воздухообмена. В таких условиях концентрации загрязняющих веществ могут превышать предельно допустимые уровни в 3-5 раз, создавая серьезную угрозу для здоровья населения и состояния экосистем.

Всеволожский район, как и вся Ленинградская область, находится в зоне умеренного-континентального климата, для которого характерна частая смена воздушных масс и соответствующие колебания атмосферного давления. Среднегодовые значения атмосферного давления в этом регионе составляют 1013-1015 гПа (760-762 мм рт. ст.), что соответствует стандартному атмосферному давлению на уровне моря. Однако сезонные колебания достаточно выражены - зимой давление обычно повышается до

1018-1022 гПа из-за преобладания антициклональной погоды, тогда как летом чаще наблюдаются пониженные значения в диапазоне 1008-1012 гПа, связанные с повышенной циклонической активностью.

Особенностью барического режима Всеволожского района является значительная изменчивость давления, обусловленная частым прохождением атмосферных фронтов. В среднем 3-4 раза в месяц через территорию проходят циклоны с характерным давлением в центре 990-1005 гПа, которые сопровождаются осадками, усилением ветра и улучшением рассеивания загрязняющих веществ. В зимний период особенно заметно влияние устойчивых антициклонов, когда давление может повышаться до 1025-1035 гПа и сохраняться на таком уровне 5-10 суток подряд, создавая неблагоприятные экологические условия.

С точки зрения экологии, барические условия оказывают существенное влияние на качество воздуха в Всеволожском районе. Периоды высокого давления (антициклоны) сопровождаются целым комплексом неблагоприятных явлений: в 60% зимних дней наблюдаются приземные температурные инверсии, которые в сочетании со слабыми ветрами приводят к увеличению концентрации PM_{2.5} в 2-3 раза по сравнению с нормальными условиями и формированию смоговых эпизодов. Напротив, при прохождении циклонов (пониженное давление) качество воздуха значительно улучшается - концентрации взвешенных частиц снижаются на 40-60% благодаря усилению ветра и улучшению вертикального перемешивания воздушных масс.

2. Экологический мониторинг в Ленинградской области

2.1 Автоматическая система мониторинга атмосферного воздуха в Ленинградской области

Система мониторинга атмосферного воздуха Ленинградской области.

В Ленинградской области действует современная автоматизированная система контроля качества атмосферного воздуха, соответствующая строгим международным стандартам. Система основана на сети стационарных мониторинговых станций, оснащенных высокоточным аналитическим оборудованием последнего поколения. Эти станции проводят непрерывные измерения основных загрязняющих веществ с минимальным временным разрешением до 1 минуты, что позволяет отслеживать динамику загрязнения в режиме реального времени.

Для измерения различных компонентов загрязнения воздуха применяются специализированные анализаторы, использующие передовые физико-химические методы. Концентрации оксидов азота определяются с помощью хемилюминесцентных газоанализаторов, работающих по принципу регистрации светового излучения при реакции оксида азота с озоном. Данная методика полностью соответствует международному стандарту CFR 40 Part 50. Для мониторинга озона используются ультрафиолетовые абсорбционные анализаторы с рабочей длиной волны 254 нм, соответствующие требованиям ЕРА.

Особое внимание уделяется контролю твердых частиц различной фракции. Измерения PM_{2.5} и PM₁₀ проводятся методом бета-поглощения по стандарту EN 12341, что обеспечивает высокую точность результатов. Для ультрадисперсных частиц применяются современные лазерные фотометры, позволяющие определять концентрации в широком диапазоне размеров. Все оборудование проходит регулярную поверку и калибровку с использованием эталонных газовых смесей.

Автоматизированная система мониторинга атмосферного воздуха предоставляет первичные данные в виде 5-минутных усреднённых значений концентраций загрязняющих веществ.

Получаемые результаты находят применение в различных сферах природоохранной деятельности. Они используются для оперативного реагирования на случаи превышения ПДК, планирования графика наблюдений, а также для формирования официальной экологической отчётности. Система обеспечивает непрерывный контроль качества атмосферного воздуха. Схема постов изображена на рисунке 1.



Рисунок 1. Схема расположения постов мониторинга качества атмосферного воздуха в Ленинградской области

2.2 Станции контроля загрязнения атмосферного воздуха в Ленинградской области



Рисунок 2. Схема расположения станций контроля загрязнения атмосферного воздуха в Ленинградской области

В Ленинградской области создана и функционирует сеть стационарных пунктов мониторинга атмосферного воздуха (см. рис.2). Эти пункты представляют собой технически оснащённые площадки, где осуществляется регулярный контроль за содержанием загрязняющих веществ в соответствии с утверждёнными методиками и регламентами.

Правила и программы работы на стационарных постах наблюдений в Ленинградской области определены в Руководстве по контролю загрязнения атмосферы РД 52.04.186-89 [10].

На стационарной станции наблюдений реализуется комплексная программа контроля качества атмосферного воздуха, направленная на определение концентраций ключевых загрязняющих веществ. В перечень контролируемых параметров включены как газообразные, так и твердые

компоненты, представляющие наибольшую опасность для экосистем и здоровья населения.

Газоаналитические измерения включают мониторинг четырех основных загрязнителей: оксида углерода (CO) - продукта неполного сгорания органического топлива; диоксида азота (NO₂) - высокореактивного соединения, образующегося в процессах высокотемпературного горения; озона (O₃) - вторичного загрязнителя, формирующегося в результате фотохимических реакций; диоксида серы (SO₂) - соединения, выделяющегося при сжигании серосодержащих топлив. Для каждого компонента применяются специализированные методы анализа, соответствующие международным стандартам.

Аэрозольные исследования сосредоточены на определении концентраций взвешенных частиц двух фракций: PM₁₀ и PM_{2.5}. Эти показатели являются важнейшими индикаторами качества воздуха, поскольку мелкодисперсные частицы способны проникать глубоко в дыхательную систему. Мониторинг проводится с использованием современных гравиметрических и оптических методов, обеспечивающих высокую точность измерений.

Станция контроля загрязнения атмосферного воздуха в Ленинградской области, выбранная для исследования установлена по адресу: г. Мурино, ул. Оборонная, дом 36. Синим цветом обозначена станция, красным - различные предприятия, загрязняющие атмосферный воздух (см. рис. 3).

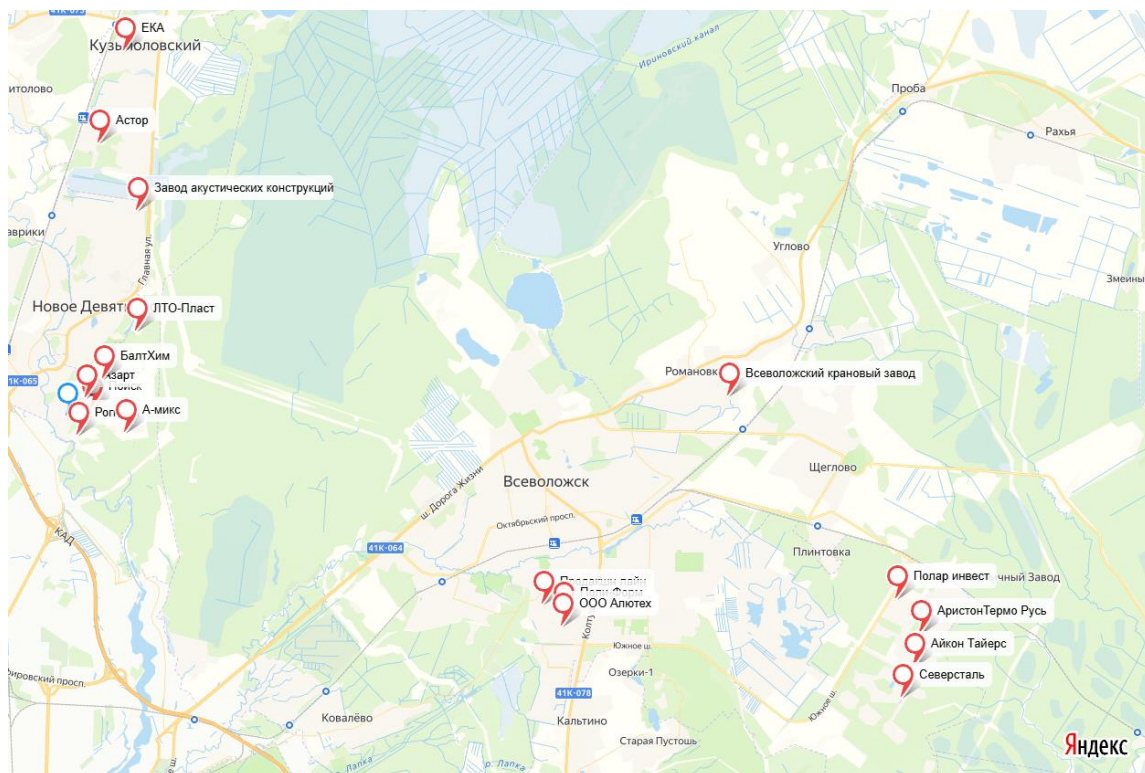


Рисунок 3. Предприятия Всеволожского района Ленинградской области

Через территорию Всеволожского района проходит Октябрьская железная дорога, а также две автодороги федерального значения: Санкт-Петербург – Мурманск и трасса «Скандинавия».

Во Всеволожском районе преобладает промышленность, где стоит отметить следующие сферы: деревообрабатывающую, производство резиновых и пластмассовых изделий, химическую, полиграфическую, производство строительных материалов, пищевую, производство бумаги и бумажных изделий, производство готовых металлических изделий.

3. Анализ сезонной изменчивости загрязнения воздуха в Всеволожском районе Ленинградской области.

3.1 Общегеографическая и климатическая характеристика Всеволожского района Ленинградской области.

Всеволожский район — один из ключевых муниципальных образований Ленинградской области, расположенный к северо-востоку от Санкт-Петербурга. Он занимает стратегическое положение между городом и Карельским перешейком, гранича с Финским заливом на западе. Территория района включает обширные леса, водные объекты и сельскохозяйственные угодья, а его административным центром является город Всеволожск.

Географические особенности:

Район расположен на Приневской низменности, где преобладают равнинные ландшафты с небольшими возвышенностями. Наивысшая точка — Лемболовские высоты (около 205 метров над уровнем моря). Гидрографическая сеть включает реки Нева, Охта, Лава, а также множество озёр, таких как Лемболовское и Кавголовское. Значительную часть территории занимают леса, преимущественно хвойные, что придаёт району экологическую ценность.

Климат Всеволожского района умеренно-континентальный, с чертами морского влияния из-за близости Балтийского моря. Зимы здесь умеренно холодные, с частыми оттепелями, а лето — тёплое, но не жаркое. Среднегодовая температура составляет около +4°C.

Температурный режим формируется под воздействием атлантических воздушных масс, которые приносят влажную и пасмурную погоду, особенно в осенне-зимний период. Влияние антициклонов проявляется в ясной и безветренной погоде, что зимой способствует усилению морозов, а летом — прогреву воздуха.

Район относится к зоне избыточного увлажнения. Среднегодовое количество осадков составляет 650–750 мм, причём максимум приходится на

лето и осень. Высокая влажность воздуха (в среднем 80–85%) обусловлена обилием водных объектов и лесов.

3.2 Анализ концентраций загрязняющих веществ

Для проведения данного исследования был выбран период с декабря 2022 года по декабрь 2023 года включительно. Указанный временной интервал позволяет провести анализ динамики концентраций загрязняющих веществ в течение полного календарного года, включая сезонные колебания.

Исходные данные по среднесуточным концентрациям загрязняющих веществ, нормированным в долях от среднесуточной предельно допустимой концентрации (ПДК_{сс}), были получены из открытых источников, предоставляемых Комитетом по природным ресурсам Ленинградской области [4]. Использование официальных данных обеспечивает достоверность и репрезентативность результатов исследования.

На основе полученных данных были составлены таблицы исходных показателей (см. Приложение), содержащие детальную информацию о концентрациях исследуемых веществ. Дополнительно для визуализации динамики изменений построены графики распределения концентраций загрязняющих веществ (ЗВ), что позволяет наглядно оценить их пространственно-временную изменчивость.

На рисунке 4 представлены графики распределения концентрации ЗВ в январе 2023 года.

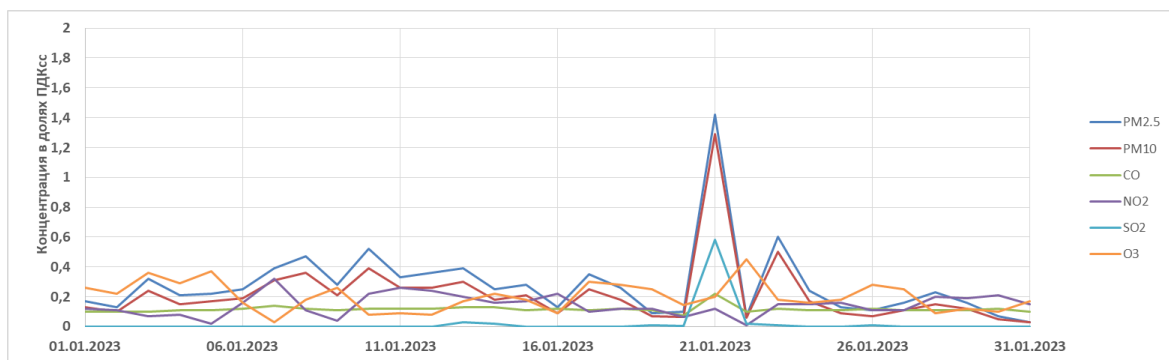


Рисунок 4. Распределение концентрации ЗВ январь 2023 года

СО (оксид углерода)

Концентрация оксида углерода за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию ПДКсс. Значения варьировались от 0,1 ПДКсс до 0,22 ПДКсс. Максимальная концентрация зафиксирована 21 января.

NO₂ (диоксид азота)

Концентрация диоксида азота за месяц не превышала среднесуточную концентрацию ПДКсс. Максимальное значение составило 0,32 ПДКсс (7 января), минимальное — 0,02 ПДКсс (5 января).

SO₂ (диоксид серы)

Концентрация диоксида серы за месяц не превышала среднесуточную ПДКсс. Максимальное значение составило 0,58 ПДКсс 22 января. Значение пропорционально другим веществам в этот день

O₃ (озон)

Концентрация озона оставалась в пределах нормы, варьируясь от 0,03 ПДКсс до 0,45 ПДКсс. Максимальное значение зафиксировано 22 января.

PM2.5 (мелкодисперсные частицы $\leq 2,5$ мкм)

Концентрация PM2.5 превысила среднесуточную ПДКсс 21 января. Месячный ход показал два выраженных максимума: 0,60 ПДКсс (23 января) и 1,42 ПДКсс (21 января). Минимальное значение составило 0,03 ПДКсс (31 января).

PM10 (мелкодисперсные частицы ≤ 10 мкм)

Концентрация PM10 также была зафиксирована выше ПДКсс. Максимальные значения зафиксированы 23 января (0,5 ПДКсс) и 21 января (1,29 ПДКсс), минимум — 0,03 ПДКсс (31 января).

На рисунке 5 представлены графики распределения концентрации ЗВ в февраль 2023 года.

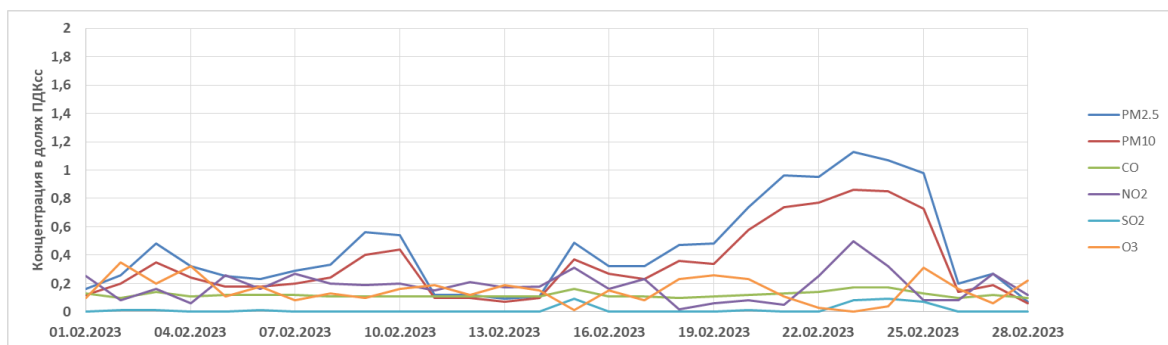


Рисунок 5. Распределение концентрации ЗВ за февраль 2023

СО (оксид углерода): Концентрация оксида углерода за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию (ПДКсс). Значения варьировались от 0,1 ПДКсс до 0,17 ПДКсс. Максимальные концентрации зафиксированы 23 и 24 февраля (0,17 ПДКсс).

NO₂ (диоксид азота): Концентрация диоксида азота за месяц не превышала ПДКсс. Диапазон значений составил от 0,02 ПДКсс (18 февраля) до 0,5 ПДКсс (23 февраля). Наибольшие концентрации отмечены 23 февраля (0,5 ПДКсс) и 24 февраля (0,32 ПДКсс).

О₃ (озон): Концентрация озона оставалась ниже ПДКсс. Минимальное значение зафиксировано 23 февраля (0 ПДКсс), максимальное — 25 февраля (0,35 ПДКсс).

PM10 (крупные взвешенные частицы): Концентрация PM10 не превысила ПДКсс. Диапазон значений — от 0,06 ПДКсс (28 февраля) до 0,86 ПДКсс (23 февраля). Пиковые значения наблюдались 20–24 февраля

PM2.5 (мелкие взвешенные частицы): Концентрация PM2.5 превысила ПДКсс. Минимум — 0,07 ПДКсс (28 февраля), максимум — 1,13 ПДКсс (23 февраля).

SO₂ (диоксид серы): Концентрация SO₂ была крайне низкой, преимущественно 0 ПДКсс. Незначительные превышения от среднего (до 0,09 ПДКсс) зафиксированы 15, 23 и 24 февраля.

На рисунке 6 представлены графики распределения концентрации ЗВ с 27 декабря 2022 по 28 февраля 2023.

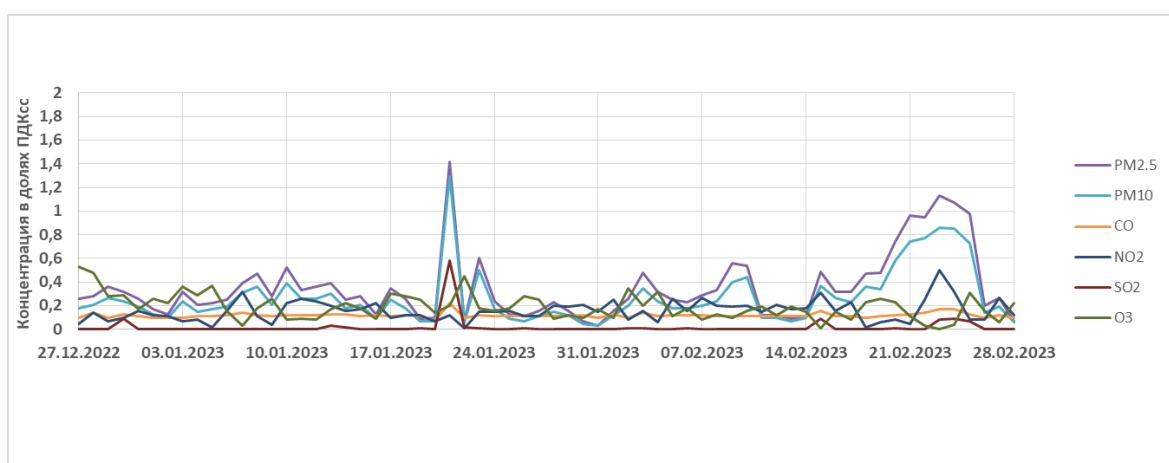


Рисунок 6. Распределение концентрации ЗВ за зимний период

PM2.5 и PM10:

Концентрации PM2.5 и PM10 были повышенными в течение всей зимы. Максимальные значения PM2.5 (1,42 ПДК) и PM10 (1,29 ПДК) зафиксированы 21 января. Также превышение зафиксировано 23 февраля.

Средние значения PM2.5 составляли около 0,3 ПДК, PM10 — около 0,2 ПДК.

CO (оксид углерода): Концентрация CO не превышала 0,22 ПДК, оставаясь в пределах нормы.

NO₂ (диоксид азота): Уровни NO₂ варьировались от 0,02 до 0,5 ПДК. Максимальные значения (0,5 ПДК) зафиксированы 23 февраля, что может быть связано с выбросами от автотранспорта и энергетических предприятий.

SO₂ (диоксид серы): Концентрации SO₂ были крайне низкими (в основном 0 ПДК), с редкими повышениями до 0.58 ПДК (21 января).

O₃ (озон): Уровни озона были низкими (0–0.53 ПДК), что типично для зимнего периода из-за недостатка солнечного света для его образования. Максимальное значение (0.53 ПДК) отмечено 27 декабря.

На рисунке 7 представлены графики распределения концентрации ЗВ с 1 марта 2023 по 31 марта 2023.

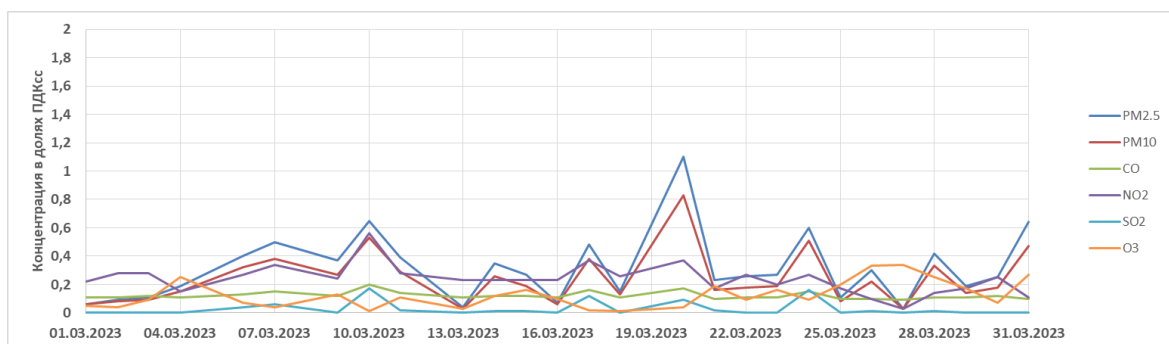


Рисунок 7. Распределение концентрации ЗВ за март 2023

PM2.5 (мелкодисперсные частицы): Концентрация PM2.5 месяц превысила ПДКсс. Среднемесячная концентрация: 0.31 ПДКсс. Минимальное значение: 0.04 ПДКсс (13 марта). Превышение ПДКсс зафиксировано 20 марта (1.1 ПДКсс). Основные пики: 20 марта (1.1 ПДКсс), 10 марта (0.65 ПДКсс), 24 марта (0.6 ПДКсс).

PM10 (мелкодисперсные частицы): Концентрация PM10 за месяц не превысила ПДКсс. Среднемесячная концентрация: 0.26. Превышения ПДКсс не зафиксировано (максимум — 0.83 ПДКсс 20 марта). Минимальное значение: 0.03 ПДКсс (13 марта).

CO (оксид углерода): Концентрация оксида углерода за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию (ПДКсс). Концентрация варьировалась от 0.09 ПДКсс до 0.2 ПДКсс. Максимальная концентрация зафиксирована 10 марта (0.2 ПДКсс).

NO₂ (диоксид азота): Концентрация диоксида азота за месяц не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Максимальная концентрация составила 0.56 ПДКсс (10 марта). Минимальное значение — 0.03 ПДКсс (27 марта).

O₃ (озон): Концентрация озона за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Концентрация варьировалась от 0.01 ПДКсс (10 марта) до 0.34 ПДКсс (27 марта).

SO₂ (диоксид серы): Концентрация диоксида серы за месяц была крайне низкой, не превышая 0.17 ПДКсс (10 марта). В большинстве дней значение составляло 0 ПДКсс.

На рисунке 8 представлены графики распределения концентрации ЗВ с 1 апреля 2023 по 30 апреля 2023.

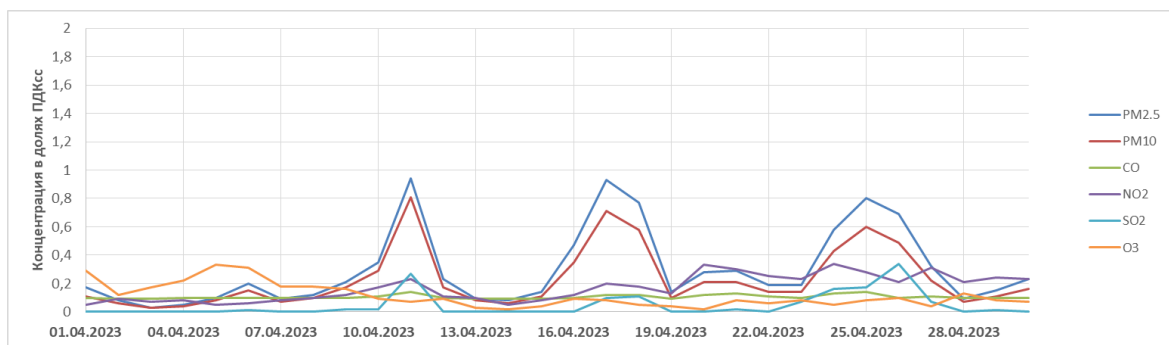


Рисунок 8. Распределение концентрации ЗВ за апрель 2023

CO (оксид углерода): Концентрация оксида углерода за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию (ПДКсс). Значения варьировались от 0,09 ПДКсс до 0,14 ПДКсс. Максимальная концентрация зафиксирована 11 и 25 апреля.

NO₂ (диоксид азота): Концентрация диоксида азота за месяц не превышала ПДКсс. Максимальная концентрация составила 0,34 ПДКсс (зафиксирована 24 апреля). Минимальное значение — 0,05 ПДКсс (наблюдалось 1, 5 и 14 апреля).

О₃ (озон): Концентрация озона за месяц не превысила ПДКсс. Значения колебались от 0,02 ПДКсс до 0,33 ПДКсс. Максимальная концентрация отмечена 5 апреля, минимальная — 14 апреля.

PM10 (мелкодисперсные частицы): Концентрация PM10 за месяц не превысила ПДКсс. Диапазон значений: от 0,03 ПДКсс до 0,81 ПДКсс. Максимумы зафиксированы 11 и 17 апреля, минимум — 3 апреля.

PM2.5 (мелкодисперсные частицы): Концентрация PM2.5 за месяц не превысила ПДКсс. Диапазон значений: 0,03–0,94 ПДКсс. Минимальная концентрация: 0,03 ПДКсс (3 апреля). Максимальная концентрация: 0,94 ПДКсс (11 апреля).

SO₂ (диоксид серы): Концентрация диоксида серы за месяц не превышала ПДКсс. Основная часть значений находилась в пределах 0–0,02 ПДКсс, с исключением 11, 17–18, 24–26 апреля, когда концентрация достигала 0,27–0,34 ПДКсс. Максимум зафиксирован 26 апреля.

На рисунке 9 представлены графики распределения концентрации ЗВ с 1 мая 2023 по 31 мая 2023.

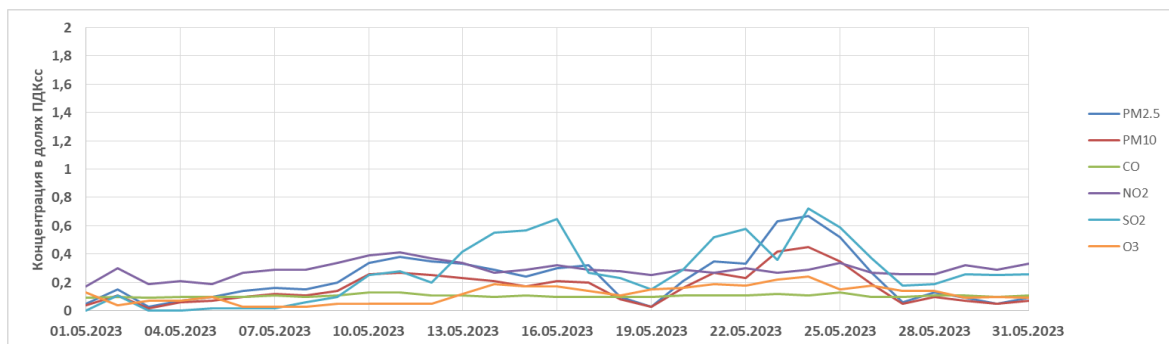


Рисунок 9. Распределение концентрации ЗВ за май 2023

CO (оксид углерода): Концентрация оксида углерода за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию (ПДКсс). Значения варьировались от 0,09 до 0,13 ПДКсс. Максимальная концентрация зафиксирована 10, 11, 13, 21, 22, 23, 24, 25, 28 и 29 мая и составила 0,13 ПДКсс.

NO₂ (диоксид азота): Концентрация диоксида азота за месяц не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Максимальная концентрация зафиксирована 11 мая и составила 0,41 ПДКсс. Минимальное значение наблюдалось 1 мая и составило 0,17 ПДКсс.

O₃ (озон): Концентрация озона за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Значения варьировались от 0,03 до 0,24 ПДКсс. Максимальная концентрация зафиксирована 24 мая и составила 0,24 ПДКсс.

PM₁₀ (мелкодисперсные частицы): Концентрация мелкодисперсных частиц за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Значения варьировались от 0,02 до 0,45 ПДКсс. Максимальная концентрация зафиксирована 24 мая и составила 0,45 ПДКсс. Минимальное значение наблюдалось 3 мая и составило 0,02 ПДКсс. Месячный ход концентраций показал два заметных пика: 10–16 мая и 21–24 мая.

SO₂ (диоксид серы): Концентрация диоксида серы за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Значения варьировались от 0 до 0,72 ПДКсс. Максимальная концентрация зафиксирована 24 мая и составила 0,72 ПДКсс. Минимальные значения (0 ПДКсс) наблюдались 1, 3, 4, 6, 7, 8, 19, 27 и 30 мая.

PM_{2.5} (мелкодисперсные частицы): Концентрация частиц PM_{2.5} за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Значения варьировались от 0,03 до 0,67 ПДКсс. Максимальная концентрация зафиксирована 24 мая и составила 0,67 ПДКсс. Минимальное значение наблюдалось 3 мая и составило 0,03 ПДКсс. Месячный ход концентраций показал два пика: 10–16 мая и 21–25 мая.

На рисунке 10 представлены графики распределения концентрации ЗВ с 1 марта 2023 по 31 мая 2023.

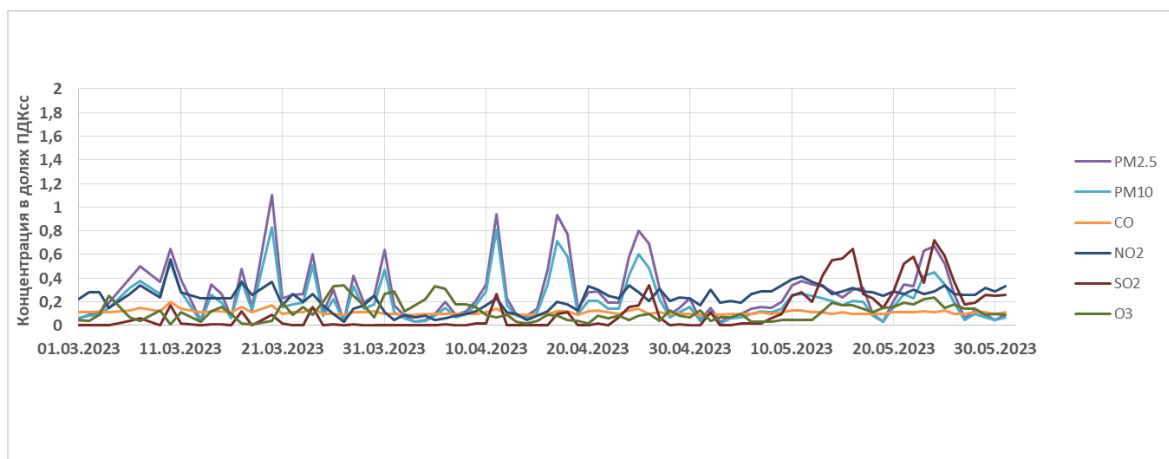


Рисунок 10. Распределение концентрации ЗВ за весну 2023

СО: концентрация оксида углерода за весенний период (март-май) не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Максимальная концентрация зафиксирована 10 марта и составила 0,2 ПДКсс. Второй пик наблюдался 17 марта - 0,16 ПДКсс.

NO₂: концентрация диоксида азота за весенний период не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Максимум концентрации зафиксирован 11 мая и составил 0,41 ПДКсс. Второй пик отмечен 10 мая - 0,39 ПДКсс.

O₃: концентрация озона за весенний период не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Максимальная концентрация зафиксирована 26-27 марта. Концентрация составила 0,34 ПДКсс.

PM₁₀: концентрация мелкодисперсных частиц за весенний период не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Месячный ход концентраций показал значения от 0,02 до 0,83 ПДКсс. Основные пики наблюдались 20 марта (0,83 ПДКсс) и 11 апреля (0,81 ПДКсс).

PM_{2.5}: концентрация мелкодисперсных частиц за весенний период имела одно превышение ПДКсс 20 марта (1,1 ПДКсс). Остальные значения варьировались от 0,03 до 0,93 ПДКсс. Основные максимумы зафиксированы 20 марта (1,1 ПДКсс), 11 апреля (0,94 ПДКсс) и 17 апреля (0,93 ПДКсс).

SO₂: концентрация диоксида серы за весенний период не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Максимальная концентрация зафиксирована 24-25 мая и составила 0,72 ПДКсс и 0,59 ПДКсс. Второй пик отмечен 16 мая - 0,65 ПДКсс.

На рисунке 11 представлены графики распределения концентрации ЗВ с 1 июня 2023 по 30 июня 2023.

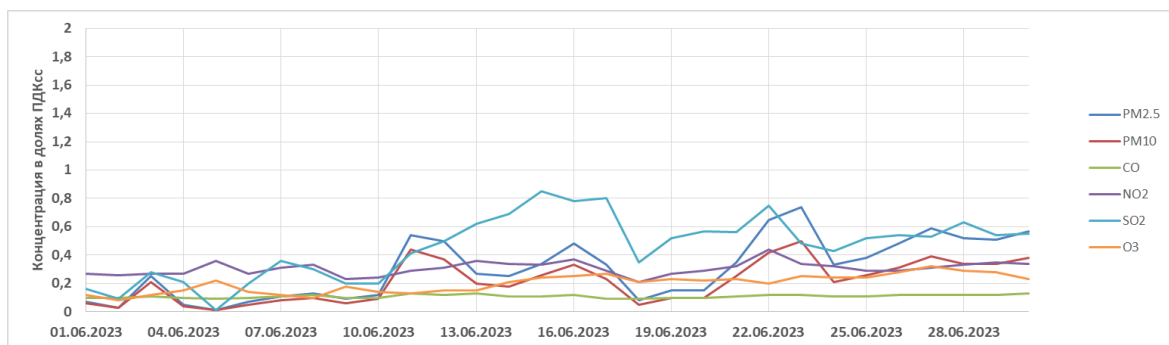


Рисунок 11. Распределение концентрации ЗВ за июнь 2023

CO (оксид углерода): Концентрация оксида углерода за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию (ПДКсс). Диапазон концентраций: 0.09-0.13 ПДКсс. Максимальные значения: 11 и 13 июня - 0.13 ПДКсс, 12 июня - 0.12 ПДКсс. Средний уровень: около 0.10 ПДКсс

NO₂ (диоксид азота): Концентрация диоксида азота за месяц не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон: 0.23-0.44 ПДКсс. Пиковые значения: 22 июня - 0.44 ПДКсс, 16 июня - 0.37 ПДКсс. Характерный уровень: 0.26-0.33 ПДКсс

O₃ (озон): Концентрация озона за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон: 0.08-0.32 ПДКсс. Максимумы: 27 июня - 0.32 ПДКсс, 26 июня - 0.28 ПДКсс. Типичные значения: 0.12-0.22 ПДКсс

PM10 (мелкодисперсные частицы): Концентрация мелкодисперсных частиц за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую

концентрацию. Диапазон: 0.01-0.44 ПДКсс. Основные пики: 23 июня- 0.5 ПДКсс, 11 июня - 0.44 ПДКсс, 22 июня - 0.42 ПДКсс. Фоновые значения: 0.03-0.21 ПДКсс

SO₂ (диоксид серы): Концентрация диоксида серы за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон: 0.00-0.85 ПДКсс. Основные максимумы: 15 июня - 0.85 ПДКсс. 16 июня - 0.78 ПДКсс. Большую часть месяца: <0.30 ПДКсс

PM2.5 (мелкодисперсные частицы): Концентрация частиц PM2.5 за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон: 0.01-0.74 ПДКсс. Максимальные значения: 23 июня - 0.74 ПДКсс, 22 июня - 0.65 ПДКсс. Средний уровень: 0.05-0.25 ПДКсс.

На рисунке 12 представлены графики распределения концентрации ЗВ с 1 июля 2023 по 27 июля 2023.

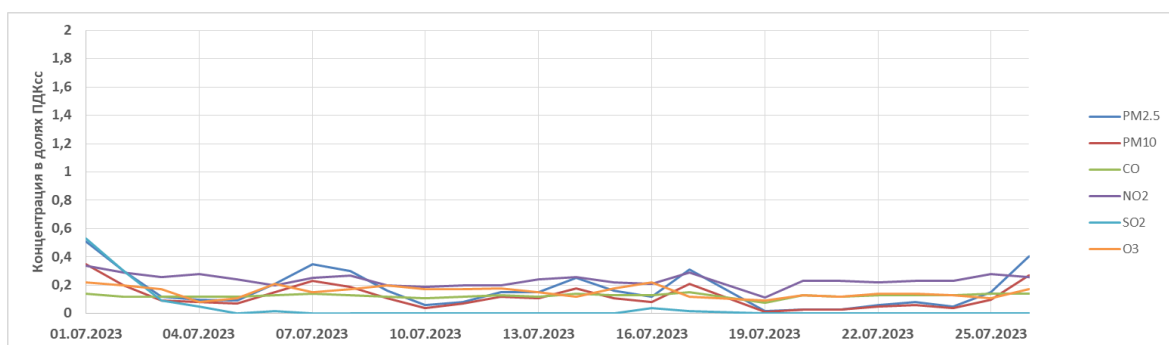


Рисунок 12. Распределение концентрации ЗВ за июль 2023

CO (оксид углерода): Концентрация оксида углерода за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию (ПДКсс). Диапазон концентраций: 0.09-0.15 ПДКсс. Максимальные значения: 17 и 27 июля - 0.15 ПДКсс. Средний уровень: 0.10-0.12 ПДКсс

NO₂ (диоксид азота): Концентрация диоксида азота за месяц не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон значений: 0.19–0.34 долей ПДКсс. Пиковый день: 1 июля- 0.34 ПДКсс. Минимальные значения: 19 июля- 0.11 ПДКсс.

O₃ (озон): Концентрация озона за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон значений: 0.08–0.22 (доли ПДКсс). Пиковые дни: 16 июля- 0.22 ПДКсс и 1 июля- 0.22 ПДКсс. Минимальные значения: 4 июля 0.08 ПДКсс

PM₁₀ (мелкодисперсные частицы): Концентрация мелкодисперсных частиц за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон значений: 0.04–0.35 ПДКсс. Пиковые дни: 1 июля 0.35 ПДКсс, 26–27 июля 0.27–0.32 ПДКсс. Минимальные значения: 19 июля 0.01 ПДКсс

SO₂ (диоксид серы): Концентрация диоксида серы за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон значений: 0–0.53 (доли ПДК). Пиковые дни: 1 июля 0.53 ПДКсс, 3 июля 0.09 ПДКсс. Минимальные значения: 5–27 июля (0.00) – SO₂ почти не фиксировался.

PM_{2.5} (мелкодисперсные частицы): Концентрация частиц PM_{2.5} за месяц не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон значений: 0.06–0.51 (доли ПДК). Пиковые дни: 1 июля 0.51 ПДКсс, 26–27 июля 0.40–0.48 ПДКсс. Минимальные значения: 19 июля 0.02 ПДКсс.

На рисунке 13 представлены графики распределения концентрации ЗВ с 1 июня 2023 по 27 июля 2023.

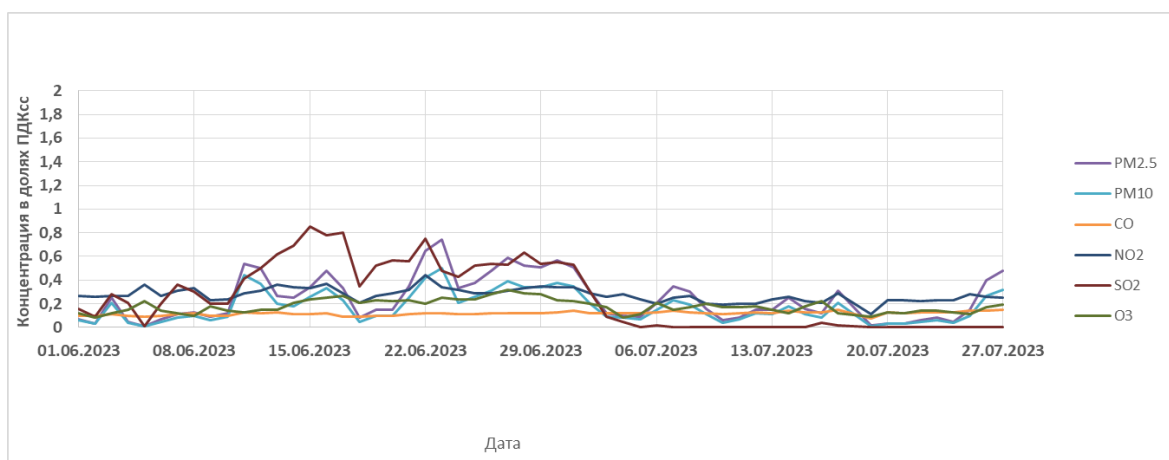


Рисунок 13. Распределение концентрации ЗВ за теплый сезон 2023

СО: концентрация оксида углерода за теплый сезон не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Максимум: 0.15 ПДКсс (26–27 июля). Минимум: 0.08 ПДКсс (19 июля). Среднее: ~0.11

NO₂: концентрация диоксида азота за теплый сезон не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Максимум: 0.44 ПДКсс (22 июня). Минимум: 0.11 ПДКсс (19 июля). Среднее: ~0.28

O₃: концентрация озона за теплый сезон не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Максимум: 0.32 ПДКсс (27 июня). Минимум: 0.08 ПДКсс (2 июня и 4 июля). Среднее: ~0.18

PM₁₀: концентрация мелкодисперсных частиц за теплый сезон не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Максимум: 0.50 ПДКсс (23 июля). Минимум: 0.01 ПДКсс (5 июня). Среднее: ~0.15.

PM_{2.5}: концентрация мелкодисперсных частиц за теплый сезон не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Максимальная концентрация: 0.74 (23 июля). Минимальная концентрация: 0.02 (19 июля). Среднее значение: ~0.19.

SO₂: концентрация диоксида серы за весенний период не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Максимум: 0.85 (15 июня). Минимум: 0 (с 4 июля). Среднее: ~0.25

На рисунке 14 представлены графики распределения концентрации ЗВ с 25 сентября 2023 по 31 октября 2023.

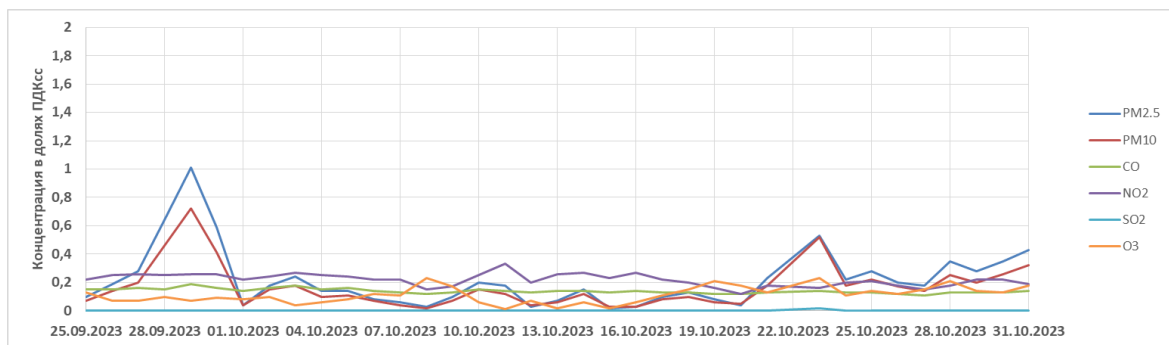


Рисунок 14. Распределение концентрации ЗВ с 25.09.2023 по 31.10.2023

PM2.5: концентрация мелкодисперсных частиц за период превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Максимальная концентрация: 1.01 ПДКсс (29 сентября). Минимальная концентрация: 0.02 ПДКсс (15 октября). Среднее значение: ~0.19 ПДКсс.

PM10: концентрация мелкодисперсных частиц за период не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Максимум — 0.72 ПДКсс (29 сентября). Минимальная концентрация: 0.02 ПДКсс (8 октября).

CO: концентрация диоксида азота за период не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. CO оставались стабильными, с небольшими пиками до 0.19 ПДКсс (29 сентября) и 0.18 ПДКсс (3 октября).

NO₂: концентрация диоксида азота за период не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. NO₂ показал более выраженные колебания, с максимумом 0.33 ПДКсс (11 октября) и несколькими пиками около 0.27 ПДКсс в середине месяца. В конце октября значения NO₂ снизились до 0.12–0.15 ПДКсс.

SO₂: концентрация диоксида серы за период не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. SO₂ практически не фиксировался, за исключением небольшого всплеска 23 октября (0.02 ПДКсс). Это говорит об отсутствии значительных промышленных выбросов в течение месяца.

O₃: концентрация озона за период не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Максимум 23 октября (0.23 ПДКсс) и 19 октября (0.21 ПДКсс). Минимальные значения (0.01–0.02 ПДКсс) наблюдались 11 и 13 октября.

На рисунке 15 представлены графики распределения концентрации ЗВ с 1 ноября 2023 по 30 ноября 2023.

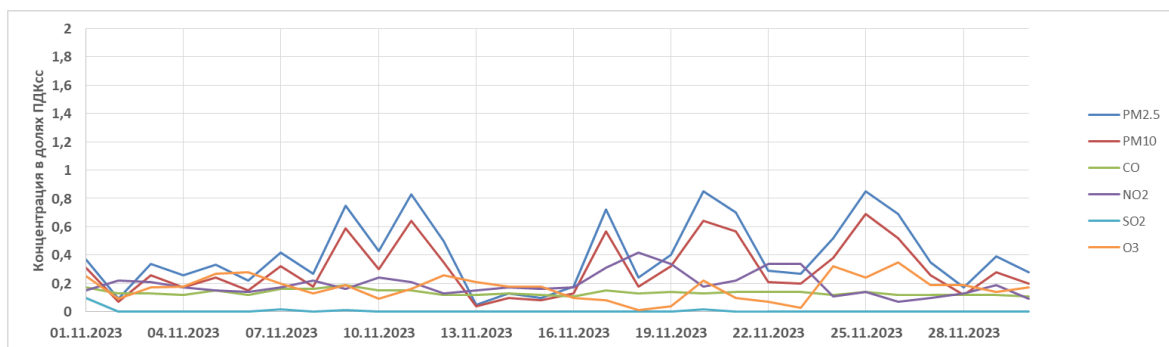


Рисунок 15. Распределение концентрации ЗВ в ноябре 2023

PM2.5: концентрация мелкодисперсных частиц за период не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Концентрация в ноябре варьировались от 0.05 ПДКсс до 0.85 ПДКсс, с несколькими выраженными пиками. Наибольшие значения зафиксированы 11 ноября (0.83 ПДКсс), 20 ноября (0.85 ПДКсс) и 25 ноября (0.85 ПДКсс). Минимальные показатели (0.05–0.1 ПДКсс) наблюдались 13–15 ноября.

PM10: концентрация мелкодисперсных частиц за период не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон: 0.04–0.69 ПДКсс. Пики пришлись на даты пиков PM2.5: 11 ноября (0.64 ПДКсс), 20 ноября (0.64 ПДКсс) и 25 ноября (0.69 ПДКсс).

CO: концентрация диоксида азота за период не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон в пределах 0.11–0.19 ПДКсс. Максимальные значения зафиксированы 9 ноября-0.19 ПДКсс. Минимум 30 ноября-0.11 ПДКсс.

NO₂: концентрация диоксида азота за период не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон в пределах от 0.07 до 0.42 ПДКсс. Максимальные значения зарегистрированы 18 ноября (0.42 ПДКсс), 19 ноября (0.34 ПДКсс) и 22 ноября (0.34 ПДКсс). Минимум зафиксирован 26 ноября- 0.07 ПДКсс.

SO₂: концентрация диоксида серы за период не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. SO₂ практически не

обнаруживался (0–0.02 ПДКсс), за исключением 7 ноября (0.02 ПДКсс) и 20 ноября (0.02 ПДКсс).

О₃: концентрация озона за период не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Уровни О₃ варьировались от 0.01 ПДКсс до 0.35 ПДКсс. Наибольшие концентрации отмечены 26 ноября (0.35 ПДКсс), Минимальные значения (0.01–0.04 ПДКсс) зафиксированы 18–19 ноября.

На рисунке 16 представлены графики распределения концентрации ЗВ с 1 декабря 2023 по 31 декабря 2023.

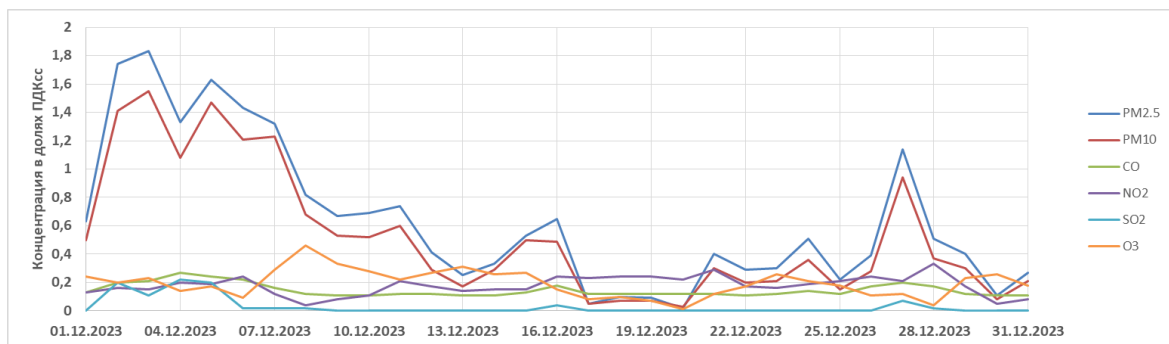


Рисунок 16. Распределение концентрации ЗВ декабрь 2023

PM_{2.5}: концентрация мелкодисперсных частиц за период превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Концентрации в декабре варьировались от 0.02 ПДКсс до 1.83 ПДКсс. Наибольшие значения зафиксированы 2 декабря (1.74 ПДКсс), 3 декабря (1.83 ПДКсс), 5 декабря (1.63 ПДКсс) и 6 декабря (1.43 ПДКсс). Минимальные показатели - 0.02 ПДКсс наблюдались 20 декабря. Превышения зафиксированы 2,3,4,5,6,7 и 27 декабря.

PM₁₀: концентрация мелкодисперсных частиц за период превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон: 0.03–1.55 ПДКсс. Пики концентрации совпадают с пиками концентрации PM_{2.5}- 2 декабря (1.41 ПДКсс), 3 декабря (1.55 ПДКсс), 5 декабря (1.47 ПДКсс) и 7

декабря (1.23 ПДКсс). Превышения концентрации зафиксированы с 2 по 7 декабря. Минимум зафиксирован 20 декабря – 0.03 ПДКсс.

СО: концентрация угарного газа за период не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон в пределах 0.11–0.27 ПДКсс. Максимальные значения зафиксированы 4 декабря (0.27 ПДКсс) и 5 декабря (0.24 ПДКсс). Минимум отмечен в отдельные дни 1, 8–10, 13–15, 17–22 и 30–31 декабря (0.11–0.13 ПДКсс).

NO₂: концентрация диоксида азота за период не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон в пределах от 0.04 до 0.33 ПДКсс. Максимальные значения зарегистрированы 28 декабря (0.33 ПДКсс), 21 декабря (0.29 ПДКсс) и 16–18 декабря (0.23–0.24 ПДКсс). Минимум зафиксирован 8 декабря (0.04 ПДКсс).

SO₂: концентрация диоксида серы за период не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. SO₂ практически не обнаруживался (0–0.02 ПДКсс), за исключением 2 декабря (0.2 ПДКсс), 3 декабря (0.11 ПДКсс), 4 декабря (0.22 ПДКсс) и 5 декабря (0.2 ПДКсс).

O₃: концентрация озона за период не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Уровни O₃ варьировались от 0.01 ПДКсс до 0.46 ПДКсс. Наибольшие концентрации отмечены 8 декабря (0.46 ПДКсс), 7 декабря (0.29 ПДКсс) и 9 декабря (0.33 ПДКсс). Минимальные значения (0.01–0.04 ПДКсс) зафиксированы 20 и 28 декабря.

На рисунке 17 представлены графики распределения концентрации ЗВ с 25 сентября 2023 по 31 декабря 2023.

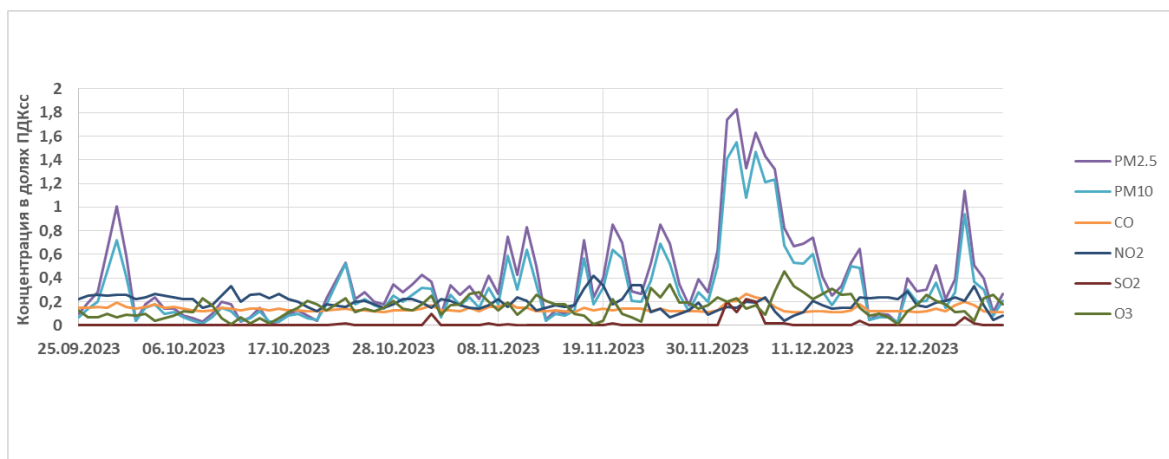


Рисунок 17. Распределение концентрации ЗВ с 25.09 по 31.12 2023.

PM2.5: концентрация мелкодисперсных частиц за период превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон: 0.02–1.83 ПДКсс. Минимальные значения (0.02–0.04 ПДКсс) зафиксированы 20 декабря, 7–8 октября и 15 октября. Пиковые значения (1.01–1.83 ПДКсс) наблюдались 29 сентября, 26 декабря и 2–6 декабря, особенно 3 декабря (1.83 ПДКсс).

PM10: концентрация взвешенных частиц за период превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон: 0.02–1.55 ПДКсс. Минимумы (0.02–0.04 ПДКсс) зарегистрированы 8 октября и 20 декабря. Максимумы (0.72–1.55 ПДКсс) отмечены 29 сентября (0.72 ПДКсс) и 3 декабря (1.55 ПДКсс).

CO: концентрация угарного газа за период не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон: 0.11–0.27 ПДКсс. Небольшие всплески отмечены 29 сентября (0.19 ПДКсс), 4 декабря (0.27 ПДКсс) и 27 декабря (0.20 ПДКсс). Минимумы (0.11 ПДКсс) зафиксированы 30 декабря.

NO₂: концентрация диоксида азота за период не превышала среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон: 0.04–0.42 ПДКсс. Максимальные значения зарегистрированы 18 ноября (0.42 ПДКсс) и

11 октября (0.33 ПДКсс). Минимумы (0.04–0.07 ПДКсс) отмечены 8 декабря и 26 ноября.

SO₂: концентрация диоксида серы за период не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Практически все значения — 0 ПДКсс, за исключением 1 ноября (0.10 ПДКсс) и 4 декабря (0.22 ПДКсс).

O₃: концентрация озона за период не превысила среднесуточную предельно допустимую концентрацию. Диапазон: 0.01–0.46 ПДКсс. Наибольшие значения отмечены 8 декабря (0.46 ПДКсс) и 26 ноября (0.35 ПДКсс). Минимумы (0.01–0.04 ПДКсс) зафиксированы 18 ноября и 3 декабря.

3.4 Анализ влияния метеорологических параметров на загрязнение воздуха

Для исследования корреляции между метеорологическими факторами и уровнем атмосферного загрязнения были проанализированы данные инструментальных наблюдений, полученные на метеорологической станции Воейково (идентификатор Всемирной метеорологической организации - 26002). Источником информации послужил архивный банк данных, доступ к которому обеспечен через специализированный интернет-портал прогностических служб [5]. На основании обработанных данных сформированы сводные таблицы исходных параметров.

Концентрация загрязняющих веществ в атмосфере находится в существенной зависимости от комплекса метеорологических факторов, включающих температурный режим, относительную влажность, скорость и направление ветровых потоков, интенсивность атмосферных осадков, а также ряд других климатических характеристик.

В рамках данного исследования целесообразно провести поэтапный анализ влияния каждого метеорологического параметра в отдельности.

Повышенный уровень солнечной радиации индуцирует фотохимические реакции, приводящие к увеличению концентрации

приземного озона. Наблюдается выраженная сезонная зависимость данного процесса: в летний период интенсивность солнечной радиации достигает максимума, что обуславливает более высокие концентрации озона по сравнению с зимним сезоном.

Сезонные температурные колебания также оказывают существенное влияние на уровень первичных загрязняющих веществ. В теплый период года снижение энергопотребления на отопительные нужды приводит к уменьшению эмиссии первичных загрязнителей. В зимних условиях при отрицательных температурах формируется характерный микроклиматический феномен - городской остров тепла [6].

Анализ представленных графических данных позволяет выявить выраженную сезонную динамику концентраций исследуемых газовых компонентов.

Наблюдается статистически значимое увеличение содержания монооксида углерода (CO) и диоксида азота (NO₂) в атмосфере в холодный период по сравнению с теплыми месяцами.

Атмосферные осадки играют существенную роль в процессах естественного очищения приземного слоя воздуха от антропогенных и природных примесей.

Наибольшая эффективность вымывания наблюдается в отношении диоксида азота (NO₂). [7]. Этот эффект обусловлен высокой растворимостью данного соединения в воде, а также его реакционной способностью, приводящей к образованию азотной кислоты в процессе взаимодействия с атмосферной влагой.

Указанный механизм существенно снижает концентрацию NO₂ в приземном слое атмосферы, особенно в период интенсивных осадков, что способствует временному улучшению качества воздуха в урбанизированных районах.

Это можно заметить с 3 по 4 марта. Скорость ветра минимальна, а концентрация NO₂ снизилась в 2 раза.

При слабых ветровых потоках (0–1 м/с) наблюдается пиковое накопление ЗВ, преимущественно обусловленное низкими источниками эмиссии. Данная закономерность объясняется ограниченной дисперсией примесей в условиях слабой турбулентности и преобладанием диффузионных процессов над адвективными.

Второй максимум концентраций фиксируется в диапазоне скоростей 3–6 м/с и связан с выбросами от высоких стационарных источников. Умеренная скорость ветра способствует эффективному горизонтальному переносу загрязняющих масс, однако при этом сохраняется достаточная интенсивность турбулентного перемешивания для их опускания к поверхности [8].

Ветровой режим Ленинградской области, согласно анализу розы ветров за репрезентативный период наблюдений, характеризуется выраженным преобладанием западных воздушных потоков (см. рис.18). Эта особенность полностью соответствует климатической норме региона, обусловленной его географическим положением в зоне западного переноса воздушных масс умеренных широт. Доминирующее направление ветров является устойчивой характеристикой местного климата, подтверждённой многолетними метеорологическими наблюдениями.

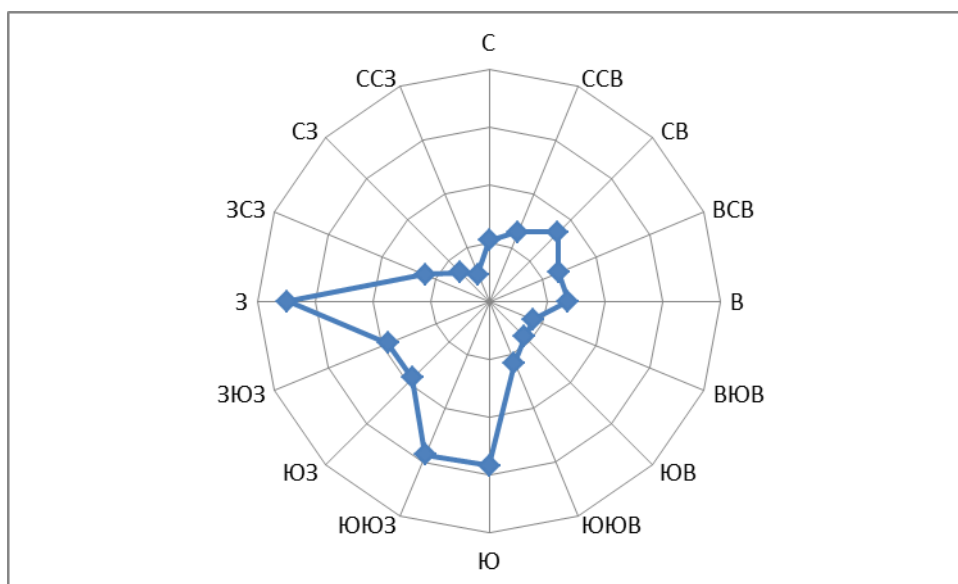


Рисунок 18. Роза ветров за исследуемый период

Кинетика рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере региона демонстрирует четкую зависимость от скорости воздушных потоков. При увеличении скорости ветра наблюдается значительное снижение концентрации всех видов атмосферных загрязнений, что объясняется эффектом интенсивного перемешивания и выноса воздушных масс. Напротив, в периоды штилевой погоды или при слабых ветрах фиксируется устойчивый рост концентрации загрязняющих веществ вследствие стагнации воздушных масс и аккумуляции примесей в приземном слое атмосферы[13].

Рассматривая розы ветров за каждый сезон можно сделать вывод, что ветровой режим соответствует режиму региона.

Роза ветров за зимний (см. рис.19) и осенний (см. рис.20) сезоны показывают преобладание южных и юго-западных ветров, и это связано с несколькими климатическими и географическими факторами.

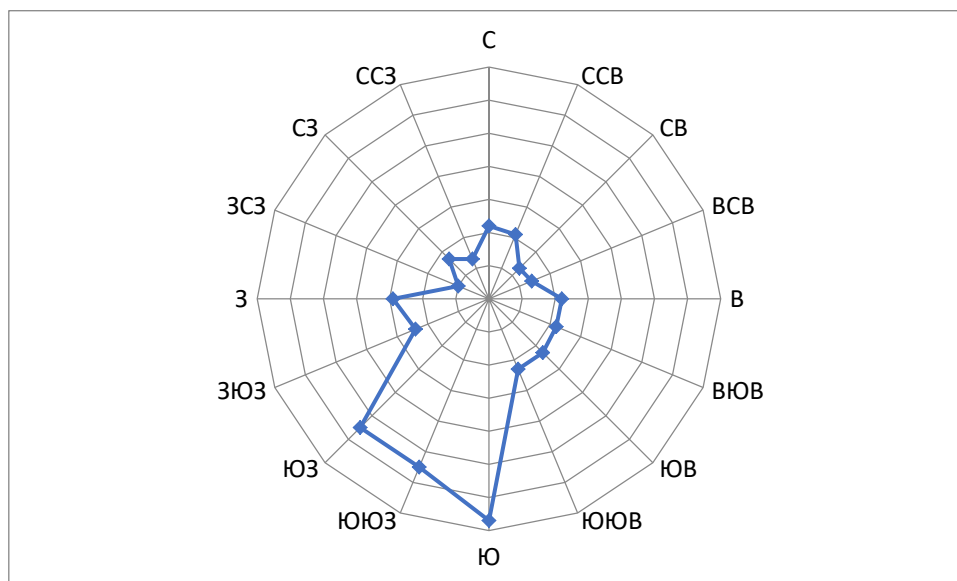


Рисунок 19. Роза ветров за зимний сезон

Основная причина — активное влияние атлантических циклонов, которые в холодное время года чаще проходят через Северную Европу. Эти циклоны приносят теплые и влажные воздушные массы с Атлантического океана, а из-за их вращения против часовой стрелки в северном полушарии Ленинградская область часто оказывается в зоне южных ветров.

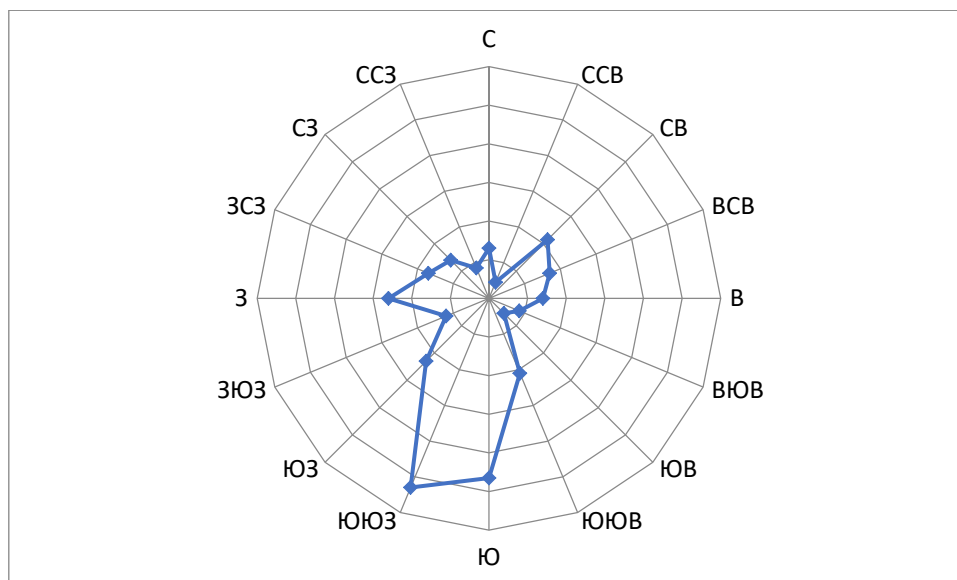


Рисунок 20. Роза ветров за осенний сезон

Географическое положение области также играет важную роль. Ленинградская область расположена близко к Балтийскому морю и Финскому заливу, что усиливает влияние морских воздушных масс. Зимой вода остывает медленнее, чем суша, поэтому ветры с юга и юго-запада приносят более мягкую, но влажную погоду. Кроме того, область находится на пути циклонов, движущихся из Северной Атлантики в сторону Скандинавии и далее на северо-восток.

Еще один фактор — взаимодействие с арктическими антициклонами. Холодный воздух из Арктики мог бы приносить северные ветры, но атлантические циклоны часто оттесняют его, создавая устойчивый южный перенос. В результате в Ленинградской области реже наблюдаются сильные морозы, характерные для континентального климата, зато чаще — пасмурная погода с осадками.

Таким образом, сочетание циклонической активности, близости Балтийского моря и общего сезонного смещения атмосферных потоков приводит к тому, что осенью и зимой в Ленинградской области преобладают южные ветры. Они смягчают зиму, но при этом делают погоду более неустойчивой и влажной.

Весной (см. рис.21) и летом (см. рис.22) в Ленинградской области преобладают западные и северо-западные ветры, что связано с сезонными изменениями атмосферной циркуляции. Основной причиной является ослабление влияния Исландского минимума, который зимой приносит южные ветры, и усиление роли Азорского антициклона. Этот высокий атмосферный фронт, располагающийся над Атлантикой, начинает доминировать в теплый период года, направляя в сторону Северо-Запада России устойчивые западные воздушные потоки.

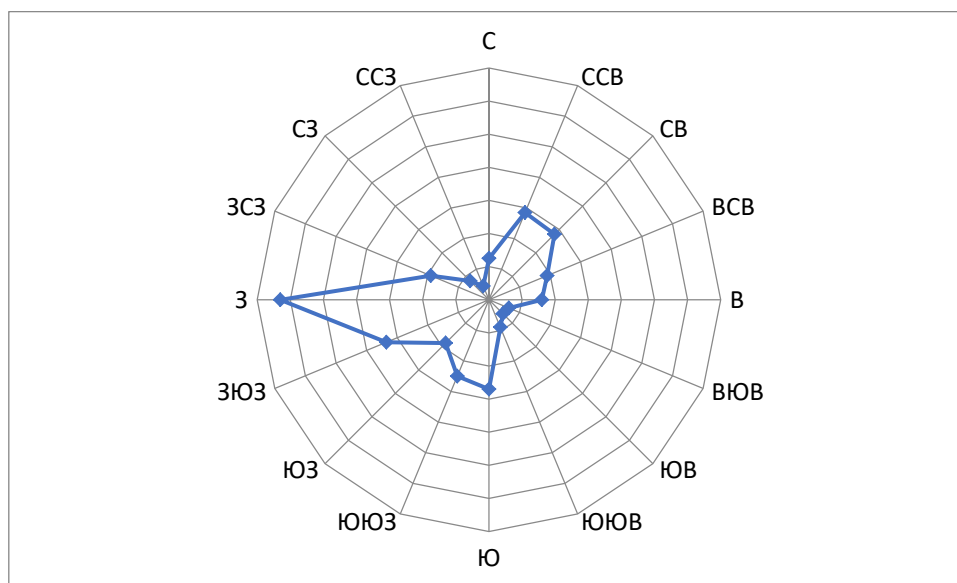


Рисунок 21. Роза ветров за весенний сезон

Важным фактором выступает разница в прогреве суши и моря. Балтийское море нагревается значительно медленнее, чем континентальные районы, что создает устойчивый перепад давления. Над теплой сушей формируется область пониженного давления, а над более холодной акваторией - повышенного. В результате возникает постоянный воздушный поток с моря на сушу, который в условиях географического положения области проявляется как западный или северо-западный ветер.

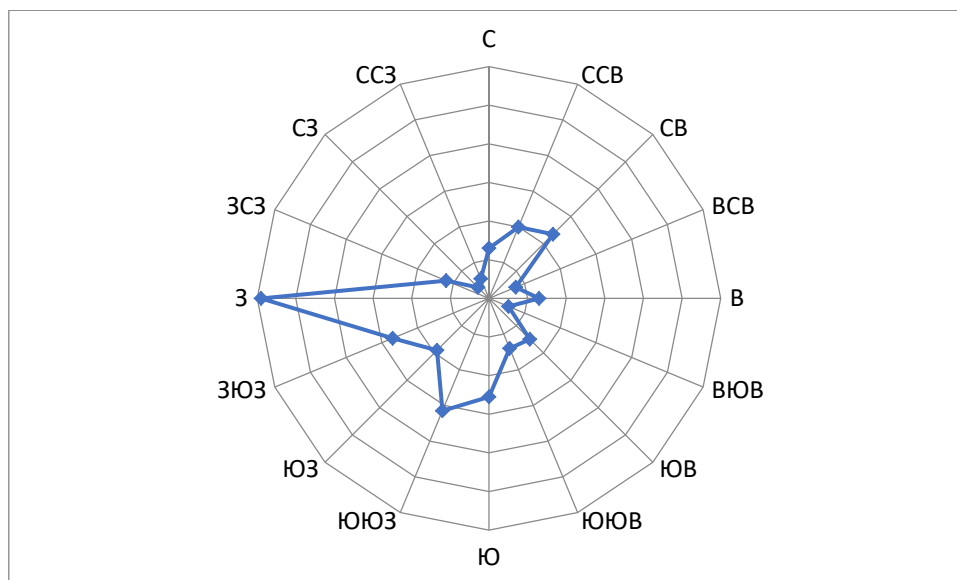


Рисунок 22. Роза ветров за летний сезон

Климат региона также определяется общей циркуляцией атмосферы в умеренных широтах, где господствует западный перенос воздушных масс. В летний период этот процесс усиливается из-за смещения к северу полярного фронта, что еще больше увеличивает вероятность западных ветров. Особенностью местной розы ветров является влияние Финского залива, который действует как своеобразный аэродинамический коридор, дополнительно усиливая воздушные потоки с запада.

Эти атмосферные процессы объясняют характерную для Ленинградской области пасмурную и дождливую летнюю погоду, так как западные ветры приносят влажные воздушные массы с Атлантики. В отличие от южных регионов России, где летом преобладают сухие ветра, Северо-Запад подвержен влиянию морских воздушных масс, что делает местный климат более прохладным и влажным в теплый период года. Сезонная смена ветрового режима является типичной особенностью умеренного морского климата, характерного для этого региона.

Облачный покров в регионе отличается высокой повторяемостью в течение всего года, достигая максимальных значений в осенне-зимний период. Такая особенность обусловлена активной циклонической деятельностью, характерной для этого времени года. Прохождение

атлантических циклонов сопровождается не только усилением облачности, но и увеличением количества осадков, а также изменением характеристик ветрового режима. Эти факторы в совокупности оказывают существенное влияние на формирование специфического микроклимата Ленинградской области.

Рассмотрим корреляционные связи между метеопараметрами и концентрациями ЗВ для каждого сезона.

Таблица 1. Корреляционные связи между веществами и метеопараметрами за 27.12.2022 по 28.02.2023

	PM2.5	PM10	CO	NO ₂	SO ₂	O ₃
Температура	-0,43	-0,41	-0,20	-0,05	0,00	0,12
Давление	0,04	0,07	0,14	0,15	0,17	-0,11
Влажность	-0,23	-0,22	-0,01	-0,05	0,04	0,24
Скорость ветра	-0,28	-0,29	-0,22	0,20	-0,20	-0,22

Наиболее значимая обратная зависимость наблюдается между температурой и концентрацией взвешенных частиц. Коэффициенты корреляции составляют -0,43 для PM2.5 и -0,41 для PM10, что указывает на слабую связь. Это означает, что с понижением температуры воздуха концентрация частиц увеличивается. Основными причинами такой зависимости являются повышенные выбросы от систем отопления в холодный период и частые температурные инверсии, которые препятствуют рассеиванию загрязнений.

Для угарного газа (CO) также выявлена слабая обратная корреляция с температурой ($r = -0,20$). Это согласуется с тем, что CO образуется преимущественно при неполном сгорании топлива, что чаще происходит в зимних условиях. Интересно, что для диоксида азота (NO₂) и диоксида серы (SO₂) связь с температурой практически отсутствует (коэффициенты близки к

нулю), что говорит о независимости их концентраций от температурного фактора зимой.

Анализ влияния скорости ветра показал слабую обратную корреляцию с концентрацией частиц ($r = -0,28$ для PM2.5 и $-0,29$ для PM10). Хотя теоретически ветер должен значительно снижать концентрацию аэрозолей, полученные коэффициенты корреляции оказались существенно ниже ожидаемых значений. Также оказалось слабое положительное влияние ветра на концентрацию NO₂ ($r = 0,20$), что может быть связано с переносом этого загрязнителя от удаленных источников.

Влажность воздуха демонстрирует слабую обратную связь с концентрацией частиц (r около $-0,23$), что можно объяснить эффектом вымывания аэрозолей при высокой влажности. Для газовых загрязнителей влияние влажности оказалось незначительным, за исключением слабой положительной корреляции с озоном ($r = 0,24$).

Давление воздуха показало минимальное влияние на все изучаемые загрязняющие вещества. Наибольший из полученных коэффициентов составил всего 0,17 для SO₂, что указывает на очень слабую связь. Это позволяет сделать вывод, что атмосферное давление не является значимым фактором, влияющим на уровень загрязнения воздуха в зимний период.

Таблица 2. Корреляционные связи между веществами и метеопараметрами за 01.03.2023 по 31.05.2023

	PM2.5	PM10	CO	NO ₂	SO ₂	O ₃
Температура	0,14	0,09	-0,20	0,31	0,71	0,00
Давление	-0,13	-0,13	-0,27	-0,10	0,16	-0,14
Влажность	-0,12	-0,12	0,09	-0,21	-0,32	0,49
Скорость ветра	-0,32	-0,33	-0,13	-0,02	-0,38	-0,23

Температура воздуха весной показывает очень слабую положительную связь с концентрациями PM2.5 ($r=0,14$) и PM10 ($r=0,09$), что контрастирует с зимними отрицательными значениями. Для диоксида азота (NO₂)

наблюдается слабая положительная корреляция ($r=0,31$), а для диоксида серы (SO_2) - средняя положительная зависимость ($r=0,71$). Это может быть связано с активизацией промышленных процессов и энергогенерации в весенний период при повышении температуры. Примечательно, что для озона (O_3) температурный фактор практически не имеет значения ($r \approx 0$).

Скорость ветра продолжает демонстрировать отрицательное влияние на концентрации загрязняющих веществ, хотя и менее выраженное, чем зимой. Наиболее значимая обратная корреляция наблюдается для SO_2 ($r=-0,38$) и взвешенных частиц ($r=-0,32$ для $\text{PM}_{2.5}$ и $r=-0,33$ для PM_{10}). Это подтверждает важную роль ветра в рассеивании загрязнений в любой сезон.

Влажность воздуха весной показывает слабую отрицательную связь с большинством загрязнителей, за исключением озона, для которого выявлена слабая положительная корреляция ($r=0,49$). Это может объясняться особенностями фотохимических процессов образования озона в условиях повышенной влажности. Для SO_2 влажность демонстрирует слабую обратную зависимость ($r=-0,32$), что может быть связано с процессами вымывания этого газа из атмосферы.

Давление воздуха весной имеет минимальное влияние на уровень загрязнения. Наибольший по модулю коэффициент корреляции составляет всего $-0,27$ для CO , что указывает на слабую связь. Это согласуется с зимними наблюдениями и подтверждает незначительную роль атмосферного давления в формировании уровней загрязнения.

Таблица 3. Корреляционные связи между веществами и метеопараметрами за 01.06.2023 по 27.07.2023

	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	CO	NO_2	SO_2	O_3
Температура	0,52	0,48	0,34	0,30	0,38	0,60
Давление	0,02	0,06	-0,36	0,12	0,31	0,12
Влажность	0,03	-0,01	0,39	-0,26	-0,53	-0,16
Скорость ветра	-0,57	-0,58	-0,02	-0,28	-0,55	-0,58

Температура воздуха показывает среднюю положительную корреляцию со всеми изучаемыми загрязнителями. Наиболее значимая связь наблюдается для озона ($r=0,60$) и $PM_{2.5}$ ($r=0,52$), что свидетельствует о существенном влиянии температурного фактора на формирование этих загрязнений в летний период. Слабые положительные корреляции зафиксированы для PM_{10} ($r=0,48$), SO_2 ($r=0,38$) и CO ($r=0,34$). Это может быть связано с активизацией фотохимических процессов и увеличением испарения летучих соединений при высоких температурах.

Скорость ветра в летний период оказывает наиболее сильное влияние на уровень загрязнения по сравнению с другими сезонами. Выявлены выраженные обратные корреляции для $PM_{2.5}$ ($r=-0,57$), PM_{10} ($r=-0,58$), SO_2 ($r=-0,55$) и особенно для озона ($r=-0,58$). Это подчеркивает критическую роль ветрового режима в рассеивании загрязнений в летних условиях. Исключением является угарный газ (CO), концентрация которого практически не зависит от скорости ветра ($r=-0,02$).

Влажность воздуха демонстрирует сложную картину влияния. Наиболее значимая обратная корреляция наблюдается для SO_2 ($r=-0,53$), что может объясняться процессами растворения этого газа в каплях влаги. Для CO , напротив, выявлена слабая положительная связь ($r=0,39$), возможно связанная с особенностями его образования в условиях высокой влажности. Концентрация озона также показывает очень слабую обратную зависимость от влажности ($r=-0,16$).

Давление воздуха летом имеет минимальное влияние на уровень загрязнения, за исключением слабой обратной корреляции с CO ($r=-0,36$) и слабой положительной связи с SO_2 ($r=0,31$). Это подтверждает сделанные ранее выводы о незначительной роли атмосферного давления в формировании уровней загрязнения.

Особого внимания заслуживает поведение озона, который демонстрирует среднюю положительную корреляцию с температурой

($r=0,60$) и столь же среднюю отрицательную связь со скоростью ветра ($r=-0,58$).

Таблица 4. Корреляционные связи между веществами и метеопараметрами за 25.09.2023 по 31.12.2023

	PM2.5	PM10	CO	NO ₂	SO ₂	O ₃
Температура	-0,46	-0,48	0,08	0,38	-0,24	-0,51
Давление	0,35	0,36	0,22	0,01	0,11	0,09
Влажность	0,14	0,11	0,08	-0,12	0,13	0,26
Скорость ветра	-0,50	-0,49	-0,18	0,35	-0,21	-0,54

Температура воздуха осенью показывает слабую обратную корреляцию с PM2.5 ($r=-0.46$) и PM10 ($r=-0.48$), а с озоном среднюю обратную корреляцию ($r=-0.51$). Это свидетельствует о значительном росте концентрации частиц и снижении уровня озона по мере похолодания. Примечательно, что для NO₂ наблюдается слабая положительная связь ($r=0.38$), что может быть связано с активизацией отопительного сезона и транспортных выбросов в начале осени при еще относительно высоких температурах.

Скорость ветра оказывает наиболее сильное влияние среди всех метеопараметров. Выявлены выраженные обратные корреляции для PM2.5 ($r=-0.50$) и PM10 ($r=-0.49$), а также для озона ($r=-0.54$). При этом для NO₂ ветер показывает неожиданную слабую положительную связь ($r=0.35$).

Давление воздуха демонстрирует слабую положительную корреляцию с концентрацией частиц ($r=0.35$ для PM2.5 и $r=0.36$ для PM10), что может быть связано с преобладанием антициклональной погоды в осенний период, способствующей накоплению загрязнений. Для других загрязнителей влияние давления незначительно.

Влажность воздуха осенью имеет очень слабое влияние на большинство загрязнителей, за исключением озона, для которого наблюдается слабая положительная связь ($r=0.26$). Это контрастирует с

летними показателями и может отражать сезонные изменения в механизмах образования и разрушения озона.

Если рассматривать комплексно влияние метеопараметров на загрязнение атмосферного воздуха, то можно выделить два ключевых фактора, определяющих процессы рассеивания и накопления загрязняющих веществ. Наибольшее значение имеет ветровой режим территории, характеризующийся скоростью и направлением воздушных потоков, в сочетании с температурной стратификацией атмосферы. Эти параметры формируют потенциал самоочищения атмосферы и определяют пространственное распределение примесей.

Рассмотрим дни превышений допустимых значений концентрации загрязняющих веществ.

21 января 2023 года фиксировалось превышение PM_{2.5} и PM₁₀. Недалеко от станции мониторинга произошёл пожар (уничтожен гаражный кооператив). Скорость ветра меньше 1 м/с, минимальная облачность. На данных радиозондирования, доступных на сайте [11] можно заметить небольшую инверсию температуры (см рис.23).

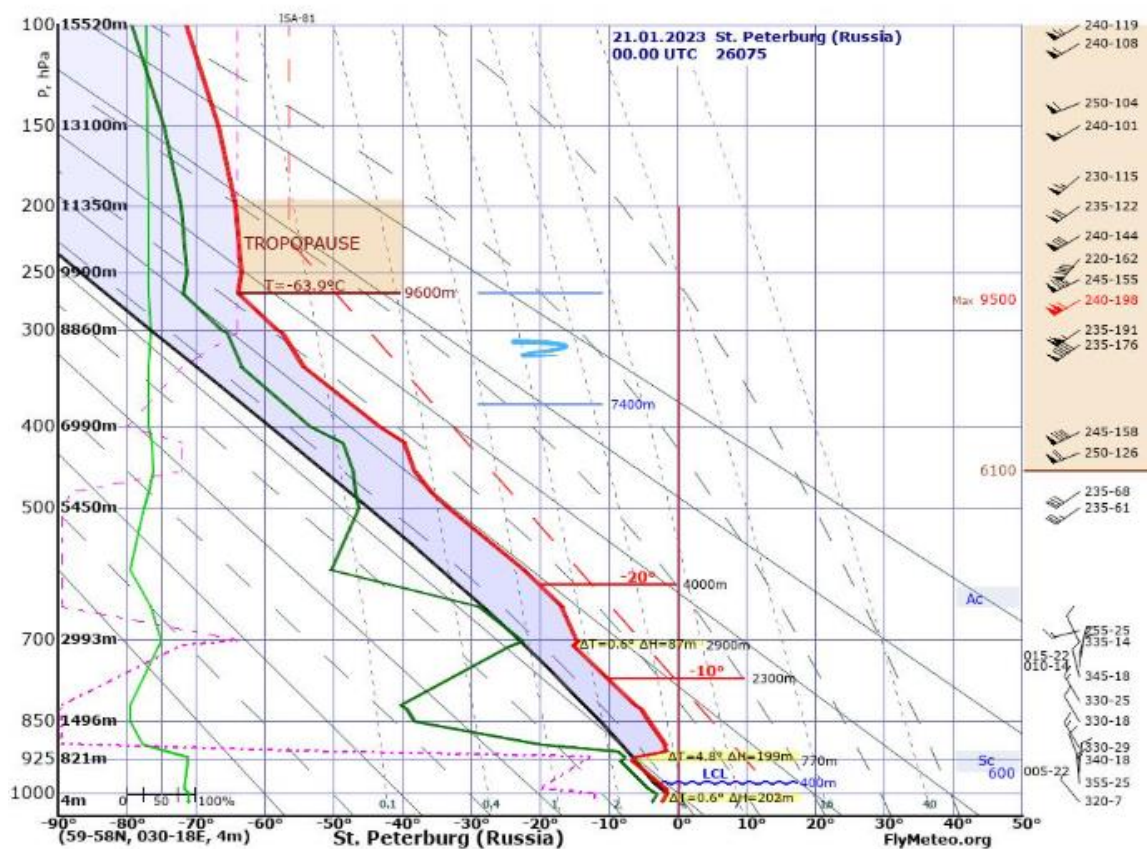


Рисунок 23. Аэрологическая диаграмма за 21.01.2023

P,hPa	H,m	T,°C	D,°C	r,%	ddd,°	V,m/s	V,km/h	V,knot
1016	4	-2.1	1.5	89	320	2	7	4
1002	181	-	-	-	010	5	18	10
1000	206	-1.5	1.5	89	010	5	18	10
989	293	-1.7	2.5	83	-	-	-	-
976	398	-	-	-	355	7	25	14
952	594	-	-	-	005	6	22	12
931	770	-6.5	1.7	88	-	-	-	-
928	795	-	-	-	340	5	18	10
925	821	-6.3	1.6	88	340	6	22	12
921	856	-6.1	1.6	88	-	-	-	-
908	969	-1.7	7.0	59	-	-	-	-
902	1022	-	-	-	330	8	29	16
894	1093	-1.9	18.0	24	-	-	-	-
850	1496	-4.1	34.0	5	330	5	18	10
825	1727	-5.3	34.0	5	-	-	-	-
818	1793	-6.1	34.0	5	-	-	-	-
810	1869	-	-	-	330	7	25	14
766	2300	-	-	-	345	5	18	10
746	2504	-	-	-	010	4	14	8
728	2692	-	-	-	015	6	22	12

Рисунок 24. Данные радиозондирования 21.01.2023

Далее рассмотрим отрезок времени с 20.02.2023 по 25.02.2023

Скорость ветра в эти дни была 1-2 м/с, низкая температура воздуха по сравнению с предыдущими днями, следовательно увеличено сжигание топлива. Весь срок зафиксированы ночные инверсии температуры(см рис. 25). Данное явление обусловлено приходом антициклона.

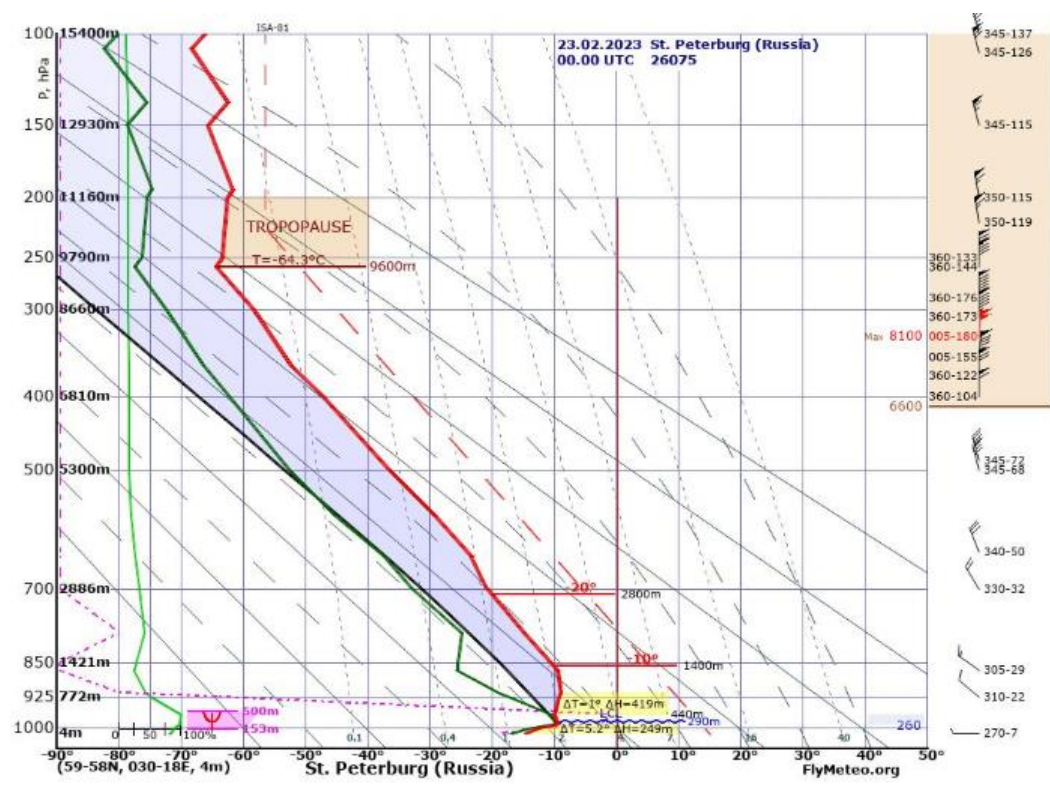


Рисунок 25. Аэрологическая диаграмма за 23.02.2023

P,hPa	H,m	T,°C	D,°C	r,%	ddd,°	V,m/s	V,km/h	V,knot
1012	4	-14.5	2.3	83	270	2	7	4
1000	167	-12.3	1.5	89	300	2	7	4
995	206	-	-	-	315	3	11	6
989	253	-9.3	0.3	98	-	-	-	-
966	436	-9.9	0.1	99	-	-	-	-
925	772	-9.1	8.0	52	310	6	22	12
915	855	-8.9	10.0	44	-	-	-	-
867	1269	-9.3	16.0	26	-	-	-	-
864	1296	-9.5	16.0	26	305	8	29	16
850	1421	-10.5	15.0	28	310	8	29	16
785	2023	-14.9	10.0	42	-	-	-	-
700	2886	-20.7	12.0	33	330	9	32	17
699	2896	-20.9	12.0	33	-	-	-	-
640	3535	-23.3	14.0	26	-	-	-	-
633	3614	-	-	-	340	14	50	27
571	4356	-29.1	16.0	20	-	-	-	-
500	5300	-36.5	16.0	17	345	19	68	37
487	5479	-	-	-	345	20	72	39
400	6810	-47.1	15.0	16	360	29	104	56
374	7245	-	-	-	360	34	122	66
362	7456	-52.3	14.0	16	-	-	-	-
352	7637	-	-	-	005	43	155	84

Рисунок 26. Данные радиозондирования 23.02.2023

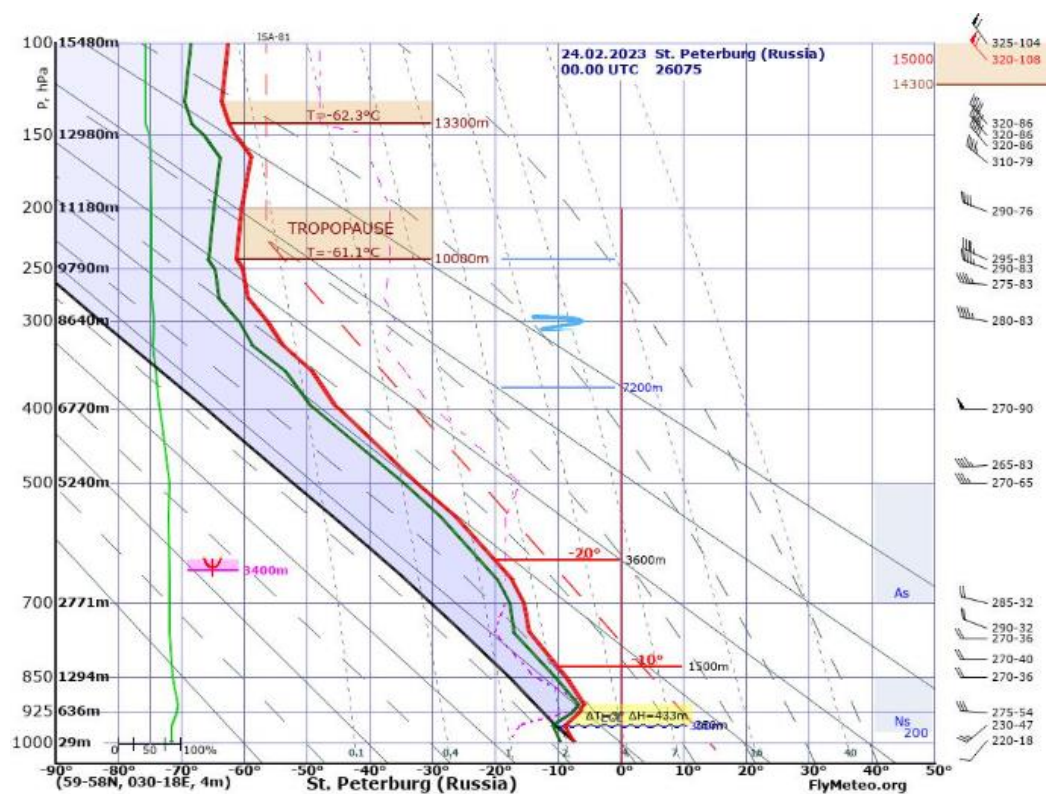


Рисунок 27. Аэрологическая диаграмма за 24.02.2023

P,hPa	H,m	T,°C	D,°C	r,%	ddd,°	V,m/s	V,km/h	V,knot
994	4	-7.5	2.2	84	220	5	18	10
956	347	-8.9	2.0	85	230	13	47	25
928	608	-	-	-	275	15	54	29
925	636	-6.5	1.0	93	275	15	54	29
908	780	-5.9	0.7	95	-	-	-	-
850	1294	-8.7	1.7	87	270	10	36	19
812	1643	-	-	-	270	11	40	21
769	2058	-	-	-	270	10	36	19
757	2177	-14.5	2.5	81	-	-	-	-
749	2258	-	-	-	290	9	32	17
700	2771	-15.3	2.3	82	285	9	32	17
690	2878	-	-	-	280	9	32	17
656	3252	-17.3	2.3	82	-	-	-	-
551	4535	-26.3	2.3	81	-	-	-	-
500	5240	-32.5	2.0	82	270	18	65	35
475	5593	-	-	-	265	23	83	45
400	6770	-44.9	3.7	66	270	25	90	49
396	6836	-45.5	3.8	65	-	-	-	-
355	7550	-49.1	4.3	60	-	-	-	-

Рисунок 28. Данные радиозондирования 24.02.2023

20 марта 2023 года зафиксировано превышение мелкодисперсных частиц. Днем температура поднялась, снежный покров растаял и обнажил пыль. Южный ветер с скоростью 2-3 м/с принёс загрязняющие вещества с крупной трассы и предприятий. Облачность почти 100%. Также зафиксирована инверсия.

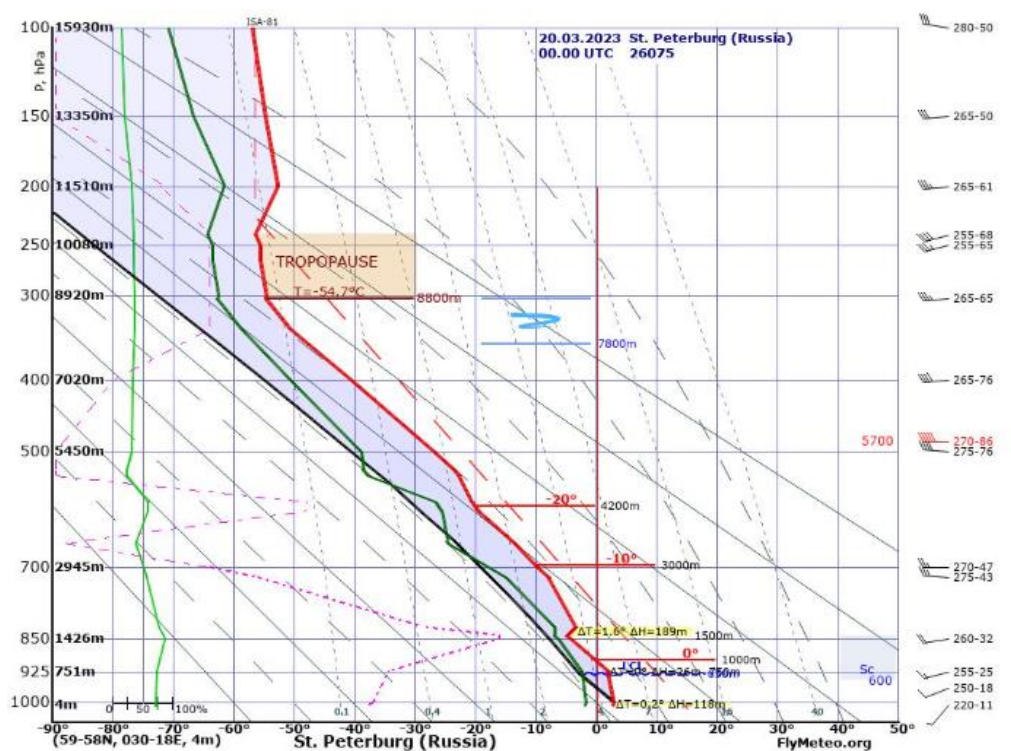


Рисунок 29. Аэрологическая диаграмма за 20.03.2023

P,hPa	H,m	T,°C	D,°C	r, %	ddd,°	V,m/s	V,km/h	V,knot
1006	4	2.8	4.7	71	220	3	11	6
1000	122	3.0	4.6	72	220	4	14	8
990	203	-	-	-	220	5	18	10
965	410	-	-	-	250	5	18	10
925	751	2.0	4.3	73	255	7	25	14
922	777	2.0	4.3	73	-	-	-	-
850	1426	-4.1	2.0	86	260	9	32	17
842	1500	-4.9	2.0	86	-	-	-	-
822	1689	-3.3	3.6	76	-	-	-	-
721	2715	-7.9	7.0	57	275	12	43	23
700	2945	-9.7	8.0	52	270	13	47	25
655	3444	-13.5	11.0	39	-	-	-	-
598	4126	-19.5	6.0	59	-	-	-	-
581	4341	-20.5	6.0	58	-	-	-	-
538	4912	-22.7	15.0	24	-	-	-	-
529	5036	-23.5	15.0	24	-	-	-	-
500	5450	-26.9	12.0	31	275	21	76	41
485	5665	-	-	-	270	24	86	47
400	7020	-40.5	10.0	33	265	21	76	41
337	8136	-50.7	8.0	37	-	-	-	-

Рисунок 30. Данные радиозондирования 20.03.2023

Следующее превышение зафиксировано 29 сентября 2023 года. Южный ветер, скорость его минимальна. Зафиксирован густой туман, горизонтальная дальность видимости 0.2 км. Туманы задерживают вещества в воздухе. Инверсия также была зафиксирована.

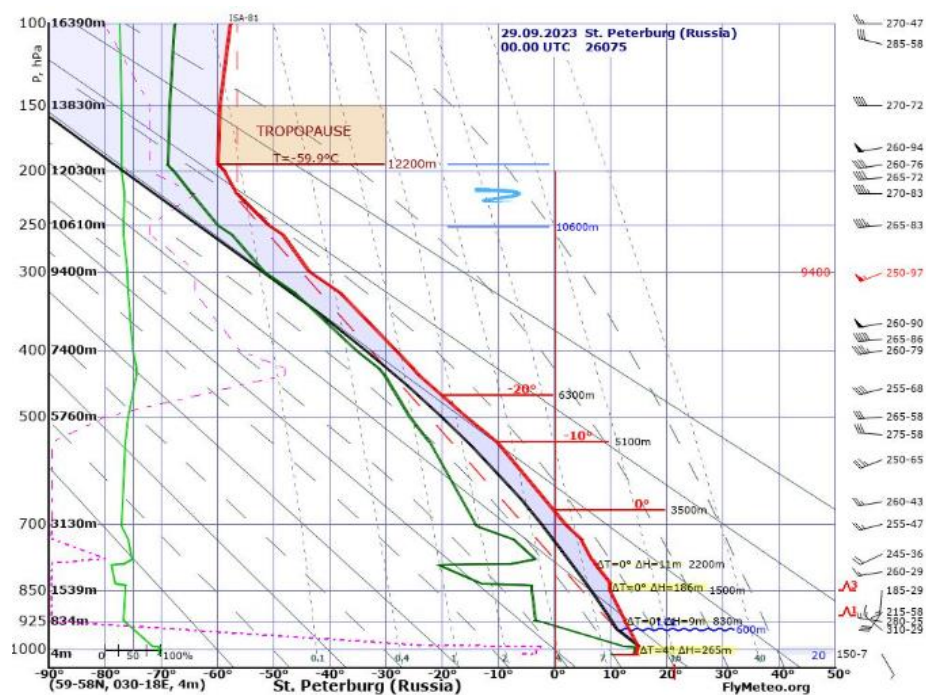


Рисунок 31. Аэрологическая диаграмма за 29.09.2023

P,hPa	H,m	T,°C	D,°C	r,%	ddd,°	V,m/s	V,km/h	V,knot
1012	4	11.0	0.7	95	150	2	7	4
1011	18	14.6	0.4	97	-	-	-	-
1000	176	14.8	0.4	97	255	6	22	12
991	252	15.0	0.3	98	-	-	-	-
989	269	15.0	2.9	83	-	-	-	-
948	627	-	-	-	310	8	29	16
925	834	12.6	15.0	35	280	7	25	14
924	843	12.6	16.0	33	-	-	-	-
923	852	-	-	-	275	7	25	14
901	1053	-	-	-	215	16	58	31
850	1539	10.0	14.0	37	185	8	29	16
849	1549	-	-	-	185	18	65	35
836	1676	10.0	14.0	37	-	-	-	-
831	1725	10.0	23.0	18	-	-	-	-
805	1986	-	-	-	260	8	29	16
788	2161	7.4	28.0	12	-	-	-	-
787	2172	7.4	15.0	34	-	-	-	-
775	2298	6.6	10.0	49	-	-	-	-
765	2404	-	-	-	245	10	36	19
732	2765	4.8	12.0	41	-	-	-	-
704	3084	2.4	16.0	30	-	-	-	-
700	3130	2.0	16.0	29	255	13	47	25
655	3654	-	-	-	260	12	43	23
575	4677	-	-	-	250	18	65	35
543	5123	-10.1	12.0	37	-	-	-	-
531	5296	-	-	-	275	16	58	31
500	5760	-15.7	10.0	42	265	16	58	31

Рисунок 32. Данные радиозондирования 29.09.2023

В декабре 2023 года 6 дней подряд зафиксировано превышение мелкодисперсных частиц. Район находился на периферии антициклона. На периферии антициклона значительно увеличивается концентрация загрязняющих веществ в воздухе. Высокая облачность, слабый ветер, туманы и дымки, снег с дождем. Главные причины превышений: Застой воздуха (антициклон + штиль), накопление на смешанных отложениях, зимние выбросы (отопление, транспорт).

4 и 5 июня 2023 года концентрация основных загрязнителей атмосферного воздуха была минимальна, так как все 4 июля фиксировался ливень и западный ветер. 5 июня усилился западный ветер и еще больше уменьшил концентрацию загрязняющих веществ атмосферного воздуха.

Заключение

На основании проведённых исследований и анализа полученных данных можно сформулировать следующие выводы.

Атмосферный воздух Всеволожского района Ленинградской области характеризуется наличием значительного количества вредных примесей, однако в целом уровень концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) не превышает допустимых норм. Наблюдается выраженная сезонная динамика: в зимний период концентрации ЗВ существенно выше, чем в другие сезоны, что обусловлено влиянием метеорологических факторов.

Установлена корреляция между температурным режимом и уровнем загрязнения: при понижении температуры наблюдается увеличение концентрации ЗВ в приземном слое атмосферы, тогда как в тёплый период их содержание снижается. Таким образом, максимальные концентрации загрязняющих веществ регистрируются в холодное время года.

Значительное влияние на уровень загрязнения оказывает ветровой режим. Увеличение скорости ветра способствует рассеиванию вредных примесей, приводя к снижению их концентрации, тогда как при слабых ветрах наблюдается их накопление. Данная закономерность проявляется как в тёплый, так и в холодный сезоны.

Также отмечено, что рост интенсивности солнечной радиации приводит к увеличению концентрации приземного озона вследствие активизации фотохимических реакций. Однако наибольшее влияние на уровень загрязнения оказывает не отдельный метеорологический параметр, а их комплексное взаимодействие.

Анализ показал, что рассмотренные метеорологические факторы в различной степени способствуют поддержанию повышенных концентраций вредных веществ в приземном воздухе. Вместе с тем, помимо природных факторов, существенное значение имеет антропогенная составляющая, включающая выбросы промышленных предприятий, транспортных узлов и

других источников, связанных с хозяйственной деятельностью человека. Следовательно, для эффективного контроля за качеством атмосферного воздуха необходимо учитывать как метеорологические условия, так и меры по снижению антропогенной нагрузки.

Список литературы

1. Бретшнайдер Б., Курфюрст И. - Охрана воздушного бассейна от загрязнений: технология и контроль: Пер. с англ. / Под ред. А. Ф. Туболкина. - Л.: Химия, 1989. - 288 с.: ил
2. Global Monitoring Laboratory [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gl_gr.html (дата обращения: 21.03.2025).
3. Статья. Уровень загрязнения атмосферного воздуха в мегаполисе и его связь с климатическими изменениями. В.Н. Боков, В.Н. Воробьев, И.А. Серебрицкий
4. Комитет по природным ресурсам Ленинградской области. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://kpr.lenobl.ru/ru/deiatelnost/ohrana-i-monitoring-okrzhayushejsredy/dannye-avtomaticheskikh-postov-monitoringa-atmosfernogo-vozduha/> (дата обращения: 01.03.2024).
5. Погода в мире. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://rp5.ru> (дата обращения: 17.05.2024).
6. Метеорологические факторы, влияющие на распространение загрязняющих веществ в атмосфере крупных городов, например, город Санкт-Петербург- с. 470
7. А. Е. Морозов Н. И. Стародубцева Метеорологические условия и загрязнение атмосферы Учебное пособие – с. 48
8. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере. Справочное пособие /Ред. Э.Ю.Безуглая и М.Е.Берлянд. – Ленинград, Гидрометеиздат, 1983.-с. 6
9. Архив радиозондирования. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://flymeteo.org/sounding/map_region.php (дата обращения: 03.07.2024).
10. РД 52.04.186-89 Руководство по контролю загрязнения атмосферы. – М., 1991

11. Гоева, А. А. Движение в атмосфере / А. А. Гоева // Вестник МГУП имени Ивана Федорова. – 2013. – № 6. – С. 33-37.

12. Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В. Загрязнение атмосферы городов. — Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1991. — 264 с.

13. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. — 272 с.

Приложение

Таблица 1. Часть архива среднесуточных концентраций ЗВ и ветра за исследуемый период

Дата	Т (°C)	Р (мм рт.ст.)	U (%)	PM2.5 (Доли ПДК)	PM10 (Доли ПДК)	CO (Доли ПДК)	NO2 (Доли ПДК)	SO2 (Доли ПДК)	O3 (Доли ПДК)	Средняя скорость
27.12. 2022	-6,9	758	85	0,26	0,18	0,1	0,05	0	0,53	3
28.12. 2022	-2,5	756	89	0,28	0,21	0,14	0,14	0	0,48	2
29.12. 2022	-2,5	758	79	0,36	0,27	0,1	0,07	0	0,28	1
30.12. 2022	-2,2	756	93	0,32	0,24	0,13	0,1	0,09	0,29	2
31.12. 2022	0,9	756	91	0,26	0,19	0,11	0,16	0	0,17	3
01.01. 2023	0,2	750	89	0,17	0,13	0,1	0,12	0	0,26	1
02.01. 2023	-3	759	86	0,13	0,1	0,1	0,11	0	0,22	0
03.01. 2023	-4,1	757	91	0,32	0,24	0,1	0,07	0	0,36	1
04.01. 2023	-5,9	760	84	0,21	0,15	0,11	0,08	0	0,29	1
05.01. 2023	-10,8	760	83	0,22	0,17	0,11	0,02	0	0,37	2
06.01. 2023	-9,5	768	81	0,25	0,19	0,12	0,16	0	0,16	0
07.01. 2023	-10,8	772	81	0,39	0,31	0,14	0,32	0	0,03	1
08.01. 2023	-17,5	771	76	0,47	0,36	0,12	0,11	0	0,18	2
09.01. 2023	-12,7	766	79	0,28	0,21	0,11	0,04	0	0,26	2
10.01. 2023	-9,5	764	81	0,52	0,39	0,12	0,22	0	0,08	3
11.01. 2023	-4,1	762	86	0,33	0,26	0,12	0,26	0	0,09	4
12.01. 2023	-5,6	758	88	0,36	0,26	0,12	0,24	0	0,08	5
13.01. 2023	-1,8	756	92	0,39	0,3	0,13	0,2	0,03	0,17	5
14.01. 2023	-0,3	759	94	0,25	0,18	0,13	0,16	0,02	0,22	4
15.01. 2023	0,4	753	90	0,28	0,21	0,11	0,17	0	0,18	5

16.01. 2023	0,1	749	90	0,13	0,09	0,12	0,22	0	0,09	5
17.01. 2023	-0,8	754	87	0,35	0,25	0,11	0,1	0	0,3	2
18.01. 2023	-0,3	755	93	0,26	0,18	0,12	0,12	0	0,28	2
19.01. 2023	0,1	751	91	0,09	0,07	0,11	0,12	0,01	0,25	4
20.01. 2023	-1,2	762	90	0,10	0,07	0,07	0,07	0,00	0,15	1
21.01. 2023	-4,2	774	86	1,42	1,29	0,22	0,12	0,58	0,2	1
22.01. 2023	-5,2	779	89	0,07	0,06	0,1	0,01	0,02	0,45	2
23.01. 2023	-6,1	780	90	0,6	0,5	0,12	0,15	0,01	0,18	1
24.01. 2023	-4,3	773	90	0,24	0,17	0,11	0,15	0	0,16	3
25.01. 2023	-1	767	93	0,13	0,09	0,11	0,16	0	0,18	4
26.01. 2023	0,1	764	95	0,11	0,07	0,12	0,11	0,01	0,28	3
27.01. 2023	-3,2	766	84	0,16	0,11	0,11	0,11	0	0,25	1
28.01. 2023	-5,9	764	84	0,23	0,15	0,11	0,2	0	0,09	3
29.01. 2023	-2,2	753	86	0,16	0,12	0,11	0,19	0	0,12	4
30.01. 2023	-0,7	738	91	0,07	0,05	0,12	0,21	0	0,1	5
31.01. 2023	-1,8	738	85	0,03	0,03	0,1	0,15	0	0,17	5
01.02. 2023	-2,3	747	86	0,16	0,12	0,13	0,25	0	0,1	1
02.02. 2023	-2,6	752	89	0,26	0,2	0,1	0,08	0,01	0,35	1
03.02. 2023	-4	756	87	0,48	0,35	0,14	0,16	0,01	0,2	1
04.02. 2023	-4,6	766	84	0,32	0,24	0,11	0,06	0	0,32	2
05.02. 2023	-7,1	772	82	0,25	0,18	0,12	0,26	0	0,11	2
06.02. 2023	-3,9	770	87	0,23	0,18	0,12	0,16	0,01	0,18	2
07.02. 2023	-4,6	776	89	0,29	0,2	0,12	0,27	0	0,08	3
08.02. 2023	-1,9	776	91	0,33	0,24	0,11	0,2	0	0,13	4
09.02. 2023	-1	768	80	0,56	0,4	0,11	0,19	0	0,1	5
10.02. 2023	-2,6	753	84	0,54	0,44	0,11	0,2	0	0,16	7

11.02. 2023	-4	755	83	0,12	0,1	0,11	0,15	0	0,19	3
12.02. 2023	-5,4	764	85	0,12	0,1	0,11	0,21	0	0,12	3
13.02. 2023	-0,5	758	87	0,09	0,07	0,11	0,17	0	0,19	5
14.02. 2023	-0,6	766	69	0,11	0,1	0,11	0,18	0	0,15	3
15.02. 2023	-0,8	769	78	0,49	0,37	0,16	0,31	0,09	0,01	1
16.02. 2023	-1,6	765	76	0,32	0,27	0,11	0,16	0	0,15	2
17.02. 2023	-5,1	758	80	0,32	0,23	0,11	0,23	0	0,08	4
18.02. 2023	-4,5	746	74	0,47	0,36	0,1	0,02	0	0,23	3
19.02. 2023	-6,3	744	82	0,48	0,34	0,11	0,06	0	0,26	2
20.02. 2023	-9,2	748	80	0,74	0,58	0,12	0,08	0,01	0,23	1
21.02. 2023	-11,8	752	76	0,96	0,74	0,13	0,05	0	0,11	2
22.02. 2023	-11,7	763	77	0,95	0,77	0,14	0,25	0	0,03	1
23.02. 2023	-11,7	762	80	1,13	0,86	0,17	0,5	0,08	0	2
24.02. 2023	-5,6	749	84	1,07	0,85	0,17	0,32	0,09	0,04	2
25.02. 2023	-4,9	747	82	0,98	0,73	0,13	0,08	0,07	0,31	1
26.02. 2023	-5,8	752	78	0,2	0,14	0,1	0,08	0	0,16	4
27.02. 2023	-6,5	763	76	0,27	0,19	0,12	0,27	0	0,06	3
28.02. 2023	-1,6	760	65	0,07	0,06	0,1	0,12	0	0,22	4

