



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
(бакалаврская работа)

На тему: «Исследование метеорологических условий, связанных с
повышенными уровнями загрязнения воздуха в Санкт-Петербурге»

Исполнитель **Черемисин Ростислав Андреевич**
(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)

«11» июня 2025 г.

Санкт-Петербург

2025

Содержание

Введение.....	3
1 Характеристика экологической обстановки в Санкт - Петербурге.....	5
1.1 Физико-географическое положение Санкт - Петербурга.....	5
1.2 Основные источники загрязнения воздуха в Санкт - Петербурге	6
1.2.1 Автомобильный транспорт.....	6
1.2.2 Промышленные предприятия.....	8
1.2.3 Строительство и коммунальное хозяйство.....	20
1.2.4 Природные факторы.....	23
1.3 Количественная характеристика выбросов загрязняющих веществ.....	27
1.4 Сезонные колебания загрязнения.....	29
2 Анализ метеорологических условий, влияющих на уровень загрязнения воздуха.....	34
2.1 Температура воздуха и температурные инверсии.....	35
2.2 Направление и скорость ветра	40
2.3 Облака и осадки.....	46
2.4 Туманы.....	50
Заключение.....	53
Список литературы.....	55
Приложение.....	58

Введение

В условиях современной урбанизации и интенсивного развития промышленности проблема загрязнения атмосферного воздуха становится одной из наиболее острых экологических проблем. Санкт-Петербург, как крупный мегаполис и важный промышленный центр России, сталкивается с серьезными вызовами, связанными с ухудшением качества воздуха. Высокий уровень загрязнения атмосферы негативно влияет на здоровье населения, экосистемы и климатические условия региона. В связи с этим изучение факторов, способствующих ухудшению качества воздуха, а также поиск эффективных мер по его улучшению, приобретают особую значимость.

Одним из ключевых факторов, влияющих на уровень загрязнения воздуха, являются метеорологические условия. Температура, влажность, скорость и направление ветра, осадки могут как способствовать рассеиванию загрязняющих веществ, так и усугублять их концентрацию в приземном слое атмосферы. Поэтому исследование взаимосвязи между метеорологическими условиями и уровнем загрязнения воздуха является важным шагом для разработки стратегий по улучшению экологической ситуации в городе.

Целью данной работы является выявление взаимосвязи между метеорологическими условиями и повышенными уровнями загрязнения воздуха в Санкт-Петербурге.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Изучить физико-географическое положение Санкт-Петербурга
2. Проанализировать основные источники загрязнения воздуха в городе и уровень загрязнения за 2023 год.
3. Исследовать влияние метеорологических условий (температуры, влажности, ветра, осадков и др.) на уровень загрязнения воздуха.

Объектом исследования является атмосферный воздух Санкт-Петербурга. Предметом исследования – метеорологические условия, влияющие на уровень его загрязнения.

Методы исследования. В работе используются методы анализа статистических данных, моделирования, сравнительного анализа, а также обобщение научной литературы и нормативно-правовых актов в области экологии и метеорологии.

Научная новизна исследования заключается в комплексном подходе к изучению взаимосвязи между метеорологическими условиями и уровнем загрязнения воздуха в Санкт-Петербурге.

Дипломная работа состоит из введения, двух глав, заключения, списка литературы и приложений. В первой главе рассматриваются физико-географические особенности Санкт-Петербурга и анализ экологической обстановки в городе, включая основные источники загрязнения воздуха. Во второй главе рассматриваются климатические условия и проводится анализ влияния метеорологических условий на уровень загрязнения воздуха.

Таким образом, данная работа направлена на углубление понимания взаимосвязи между метеорологическими условиями и уровнем загрязнения воздуха

1 Характеристика экологической обстановки в Санкт-Петербурге

1.1 Физико-географическое положение Санкт-Петербурга

Санкт-Петербург находится в северо-западной части России, занимая прибрежную зону Финского залива Балтийского моря, а также дельту реки Невы и прилегающие острова. Протяжённость города в направлении с северо-запада на юго-восток достигает 90 км. Хотя территория в целом равнинная, окружающий ландшафт отличается разнообразием: к юго-западу расположена Ижорская возвышенность, а на севере – холмистые массивы Карельского перешейка и Приморско-Вуоксинский район с многочисленными озёрами. Природные условия региона характеризуются таёжными лесами, постепенно сменяющимися смешанными и широколиственными массивами.

Климат Санкт-Петербурга формируется под влиянием его географического положения и относится к умеренному типу, сочетающему черты морского и континентального. Координаты города: $59^{\circ}57'$ с. ш. и $30^{\circ}19'$ в. д. Общая площадь территории составляет 1439 км², при этом зона сплошной городской застройки занимает около 650 км². В границы города входят акватория Невской губы, устье Невы и острова её дельты. Высотные отметки варьируются: в центральной части – 1–5 м над уровнем моря, в северных районах – 5–13 м, а на юго-западе – до 22 м [1].

Санкт-Петербург имеет статус города федерального значения и подразделяется на 18 административных районов(рис.1). Наиболее крупные по площади и населению включают Пушкинский, Курортный, Выборгский и Приморский районы. Максимальная плотность заселения наблюдается в Центральном, Калининском и Адмиралтейском районах. В рамках муниципального деления в городе выделяют 111 внутригородских образований [2].

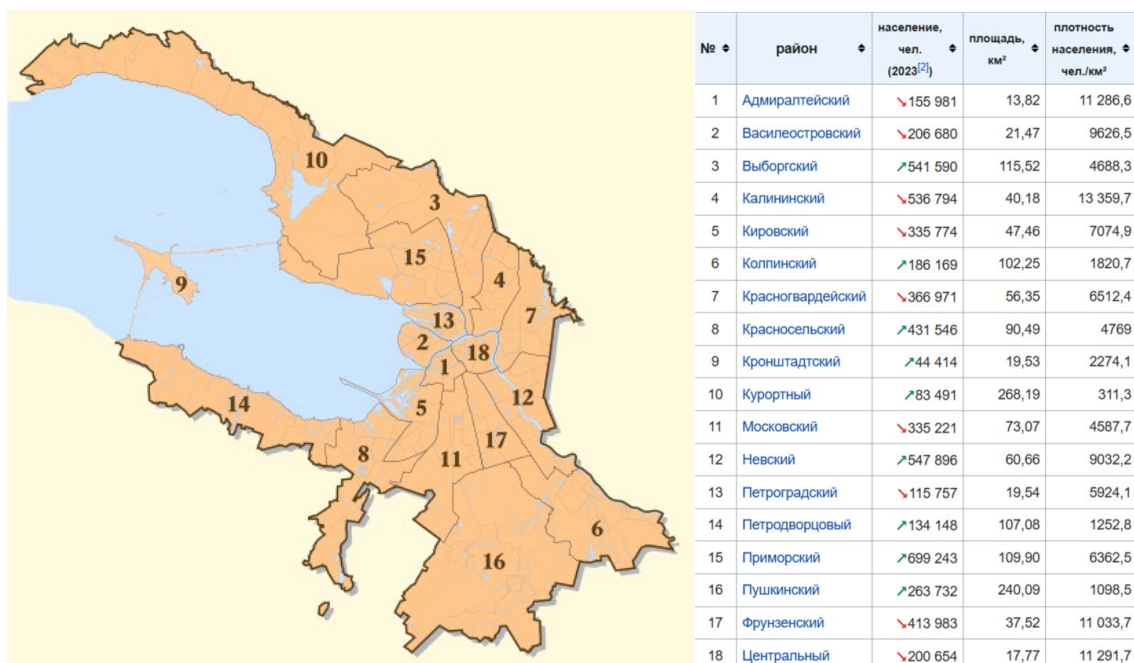


Рисунок 1. Карта административных районов Санкт - Петербурга

1.2 Основные источники загрязнения воздуха в Санкт - Петербурге

Загрязнение атмосферы представляет собой одну из наиболее значимых экологических проблем Санкт-Петербурга. В атмосфере города в связи с большим количеством источников загрязнения атмосферного воздуха, отмечается присутствие совокупности вредных и токсичных веществ. Основными источниками загрязнения являются:

1.2.1 Автомобильный транспорт

Согласно данным доклада об экологической ситуации в Санкт-Петербурге (2023), основным источником атмосферных загрязнений в городе выступает автотранспорт, обеспечивающий 48% от общего объема выбросов (около 140 тысячи тонн). Данный показатель существенно выше, чем доля промышленных объектов, что обусловлено интенсивным движением транспорта, преобладанием устаревших автомобилей и недостаточным развитием экологических альтернатив [3].

Основные загрязняющие вещества от автотранспорта представлены на рисунке 2.

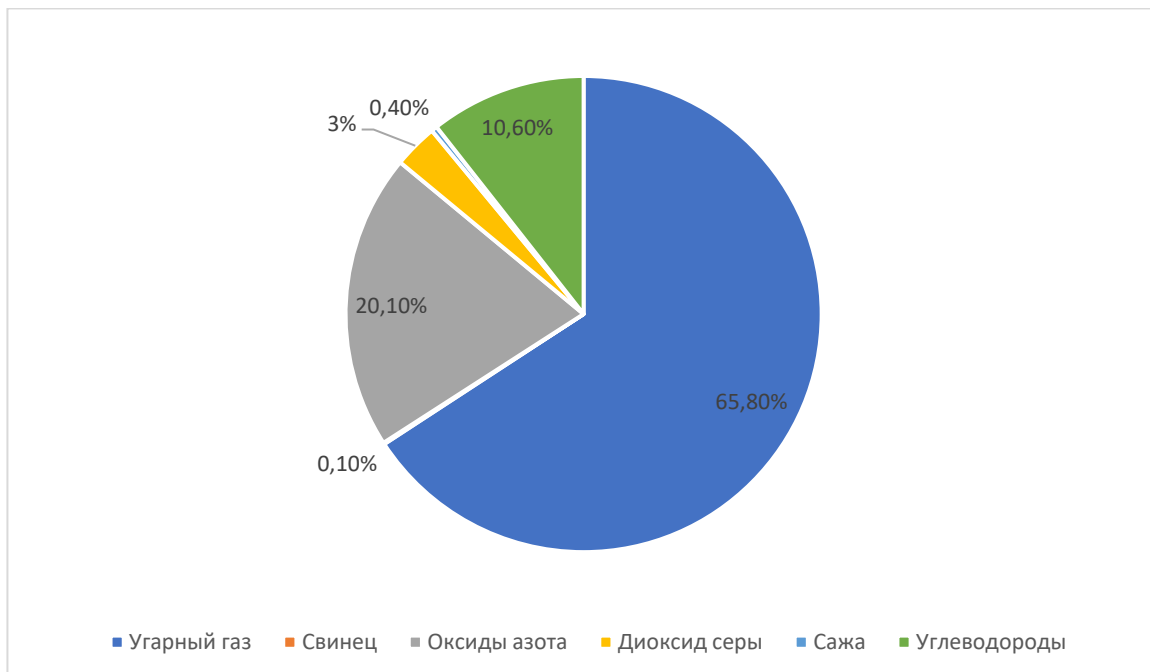


Рисунок 2. Основные загрязняющие вещества от автотранспорта

Факторы, усугубляющие загрязнение от транспорта:

- Высокая плотность автомобилей

По информации ГИБДД (2024), в Санкт-Петербурге эксплуатируется более 2 миллионов транспортных средств. Максимальный рост концентрации выбросов отмечается в периоды пиковой нагрузки на дорожную сеть (утренние часы 8:00–10:00 и вечерние 17:00–19:00), когда объём вредных веществ в атмосфере увеличивается в 2–3 раза [4].

- Устаревший автопарк

Приблизительно треть автомобилей города не отвечает современным экологическим требованиям (стандарт Евро-4 и выше). Особую проблему представляют дизельные транспортные средства (грузовики, автобусы), которые выделяют в 5–7 раз больше оксидов азота (NO_x) и взвешенных частиц (PM), чем машины с бензиновыми двигателями.

- Особенности городской планировки

Историческая застройка с узкими улицами препятствует эффективному рассеиванию автомобильных выхлопов. Наиболее высокие уровни загрязнения воздуха регистрируются на Московском проспекте (до 120 мкг/м³ NO₂ при норме 40 мкг/м³), Лиговском проспекте, КАД и ЗСД – зонах с интенсивным грузовым движением.

В холодный период года наблюдается значительное увеличение концентраций угарного газа (СО). Это обусловлено необходимостью продолжительного прогрева автомобильных двигателей при низких температурах и частым возникновением приземных температурных инверсий, препятствующих вертикальному рассеиванию загрязнений.

В теплый сезон под воздействием солнечной радиации происходит активизация фотохимических процессов, приводящая к образованию вторичного загрязнителя - приземного озона (O₃). Его формирование происходит в результате сложных реакций между оксидами азота (NO_x) и активными радикалами под влиянием ультрафиолетового излучения [5].

1.2.2 Промышленные предприятия

Значительный вклад в ухудшение качества воздушной среды Санкт-Петербурга вносят промышленные предприятия. Особую экологическую проблему создаёт их территориальное расположение - большинство производственных объектов находится в пределах городской застройки, что усиливает их негативное воздействие на окружающую среду.

Согласно подсчётам, доля промышленных предприятий Санкт-Петербурга в общем объеме атмосферных выбросов составляет 27%. Несмотря на меньший вклад по сравнению с автотранспортом, промышленные выбросы обладают рядом характерных особенностей:

1. Повышенным содержанием высокотоксичных химических соединений.

2. Локализованным воздействием с образованием зон экологической напряженности.
3. Наличием уникальных загрязняющих веществ, не характерных для транспортной эмиссии.

Основные промышленные загрязнители и их источники представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные промышленные загрязнители и их источники

Тип предприятия	Ключевые загрязнители	Районы размещения	Удельный вес в промышленных выбросах
Энергетика (ТЭЦ, котельные)	SO ₂ , NO _x , сажа, зола	Все районы города	59%
Нефтепереработка и химия	Бензол, формальдегид, сероводород	Кировский район, промзона "Парнас", Ленинградская область	21%
Металлургия и машиностроение	Тяжелые металлы (Pb, Cd, Ni), пыль	Колпинский район, Невский район, Кировский	7%
Целлюлозно-бумажные комбинаты	Сероуглерод, меркаптаны	Ленинградская область	12%

Удельный вес предприятий в промышленных выбросах представлен на рисунке 3.



Рисунок 3. Удельный вес в промышленных выбросах

- Энергетические предприятия как источник загрязнения атмосферы Санкт-Петербурга.

Согласно исследованиям, объекты энергогенерации (теплоэлектроцентрали, локальные и квартальные котельные) ответственны за 59% общего объема промышленных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу Санкт-Петербурга. Наблюдается выраженная сезонная динамика: в период с октября по апрель их доля в структуре промышленных выбросов увеличивается до 60-65%, что связано с повышенной нагрузкой в отопительный сезон [2].

География основных источников представлена на рисунке 4.

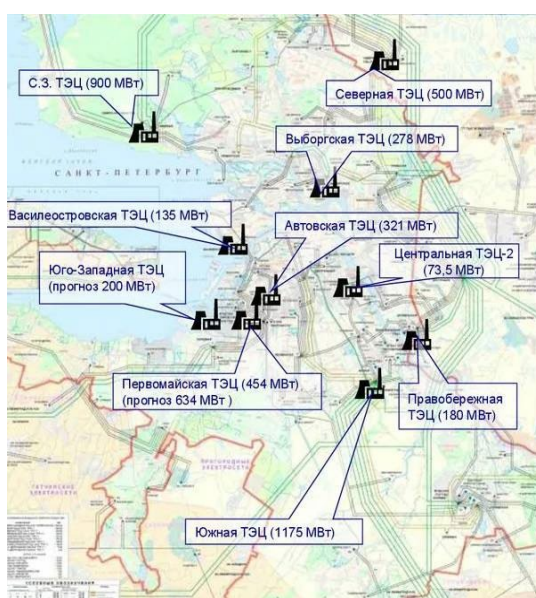


Рисунок 4. Схема размещения ТЭЦ

В таблице 2 представлено количество выбросов ТЭЦ [6].

Таблица 2. Количество выбросов ТЭЦ

Энергетическое предприятие	Выбросы (т/год)
Центральная ТЭЦ	4850
Правобережная ТЭЦ	6 100
Василеостровская ТЭЦ	5200

Выборгская ТЭЦ	12 700
Автовская ТЭЦ	4 700
Первомайская ТЭЦ	4 850
Северная ТЭЦ	3 200
Южная ТЭЦ	3 800
Северо-Западная ТЭЦ	3000
Юго-Западная ТЭЦ	2000

Современные энергетические предприятия Санкт-Петербурга используют три основных вида топлива, каждый из которых выполняет определенную функцию в системе энергоснабжения (см. рис. 5). Основу топливного баланса составляет природный газ, на долю которого приходится порядка 85% от общего объема используемого топлива. Этот вид топлива является приоритетным для большинства энергогенерирующих мощностей города.

В качестве резервного топливного ресурса применяется уголь, составляющий около 10% топливного баланса. Его использование активизируется в периоды повышенных нагрузок или при возникновении перебоев с поставками природного газа.

Замыкает топливную структуру мазут, занимающий приблизительно 5% в общем объеме потребляемого топлива. Этот вид топлива выполняет функцию аварийного резерва и используется в исключительных случаях при возникновении критических ситуаций в системе энергоснабжения [6].

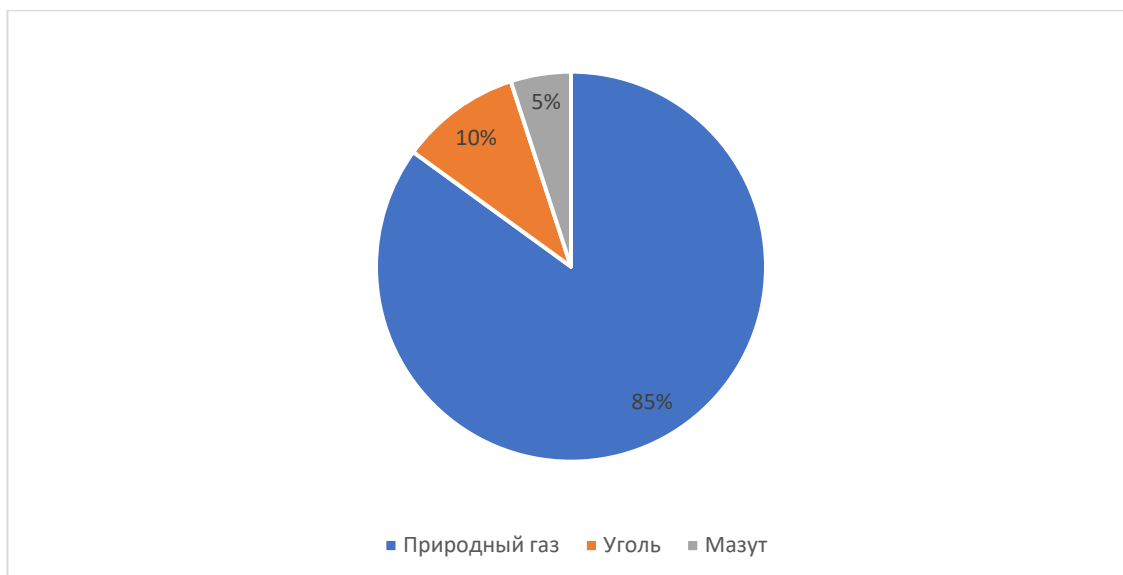


Рисунок 5. Три основных вида топлива

Зависимость выбросов от типа топлива представлена в таблице 3 [7].

Таблица 3. Зависимость выбросов от типа топлива

Топливо	SO ₂ (кг/т)	NO _x (кг/т)	Зола (кг/т)	CO (кг/т)
Природный газ	0,01	1,8	0,001	0,2
Уголь	16,5	2,4	28,0	0,5
Мазут	18,7	2,1	1,2	0,3

- Нефтеперерабатывающие и химические предприятия как источники загрязнения атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге.

Проведенный анализ показывает, что предприятия нефтехимического комплекса Санкт-Петербурга генерируют около четверти (21%) от общего объема промышленных выбросов, при этом особенностью данных выбросов является наличие высокотоксичных соединений. На территории города и его ближайших пригородных зон сосредоточено семь крупных производственных объектов данной отрасли, деятельность которых приводит к образованию стабильных зон с повышенным уровнем загрязнения. (см. рис. 6 и табл. 4)

Ключевые предприятия:

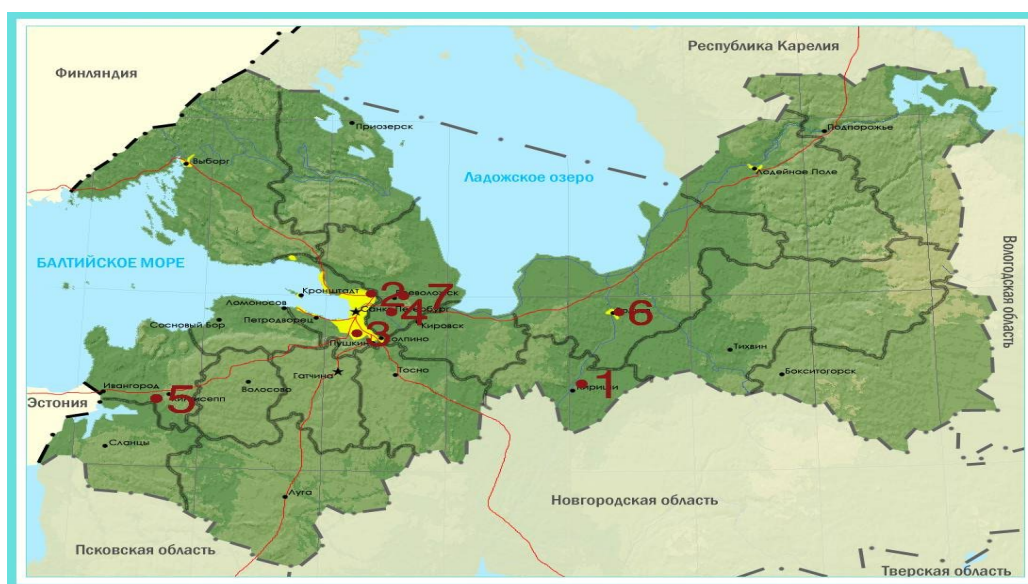


Рисунок 6. Нефтеперерабатывающие и химические предприятия

Таблица 4. Количество выбросов нефтехимических предприятий

Нефтехимическое предприятие	Выбросы
1) ПАО "Киришинефтеоргсинтез" (КИНЕФ)	~8,700 т/год
2) АО "Петербургский нефтеперерабатывающий завод" (ПНПЗ, промзона "Парнас")	~3,200 т/год
3) ООО "Газпромнефть — Смазочные материалы" (ГСМ, промзона "Шушары")	~1,500 т/год
4) АО "Химический завод им. Ломоносова"	~900 т/год
5) ОАО "Фосфорит" (г. Кингисепп)	~2,100 т/год
6) ООО "Лукойл-Лубрикантс" (г. Волхов)	~800 т/год
7) АО "Полипласт" (г. Всеволожск)	~600 т/год

В структуре нефтеперерабатывающих предприятий Санкт-Петербурга можно выделить несколько ключевых производственных процессов,

оказывающих существенное влияние на выбросы загрязняющих веществ в атмосферу (см. табл. 5). На первом этапе осуществляется первичная переработка нефти методом атмосферной перегонки, в ходе которой сырая нефть разделяется на фракции с различной температурой кипения. Этот процесс сопровождается выбросами легких углеводородов и сернистых соединений. Важнейшим процессом вторичной переработки является каталитический крекинг, предназначенный для получения высокооктановых компонентов бензина из тяжелых нефтяных фракций. Данная технология характеризуется значительными выбросами оксидов углерода, азота и серы, а также мелкодисперсных частиц катализатора. Процесс риформинга, используемый для повышения качества нефтепродуктов, сопровождается образованием ароматических углеводородов, включая бензол, толуол и ксилолы, которые представляют особую экологическую опасность. Завершающим этапом является производство нефтехимической продукции, включающее синтез полимеров и других химических соединений. Этот цикл отличается комплексными выбросами, содержащими как газообразные загрязнители, так и летучие органические соединения. Все указанные технологические процессы вносят существенный вклад в загрязнение атмосферного воздуха Санкт-Петербурга, при этом их воздействие усиливается в определенных метеорологических условиях, таких как температурные инверсии и слабые ветры [8].

Таблица 5. Характер выбросов по процессам [8].

Техпроцесс	Основные загрязнители	Особенности выбросов
Перегонка нефти	Сероводород (H ₂ S), меркаптаны	Запах, коррозионная активность
Каталитический крекинг	Бензол, толуол, этилбензол	Канцерогенное действие
Очистка продуктов	Аммиак (NH ₃), серная кислота	Раздражающее действие
Хранение	Углеводороды (C ₆ -C ₁₀)	Фотохимический смог

- Металлургические и машиностроительные предприятия как источники загрязнения атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге.

Промышленные предприятия металлургического профиля и машиностроения вносят существенный вклад в загрязнение атмосферы Санкт-Петербурга, обеспечивая 7% от общего объема промышленных выбросов. Особую экологическую проблему представляют характерные для данной отрасли высокотоксичные соединения, поступающие в атмосферный воздух. На территории мегаполиса расположено пять крупных производственных объектов данного промышленного сектора, деятельность которых приводит к формированию устойчивых зон с повышенной экологической нагрузкой (см. рис. 7 и табл. 6). Эти локальные участки отличаются стабильно высокими концентрациями специфических загрязняющих веществ (см. табл.7 рис. 8) [2].

Ключевые предприятия:



Рисунок 7. Промышленные предприятия металлургического профиля и машиностроения

Таблица 6. Количество выбросов промышленных предприятий металлургического профиля и машиностроения

Предприятие	Выбросы (тонн/год)
1) АО "Ижорские заводы"	2 800
2) ОАО "Северная верфь"	1 200
3) ЗАО "Терминал"	950
4) АО "Ленинградский металлический завод" (ЛМЗ)	870
5) ООО "Петросталь"	680

Структура выбросов по технологическим процессам:

Таблица 7. Доля в выбросах сектора технологических процессов

Технологический процесс	Основные загрязнители	Доля в выбросах сектора
Литье и плавка металлов	Оксиды металлов, СО	38%
Сварочные работы	Аэрозоли металлов, озона	29%
Механическая обработка	Абразивная пыль, масляный туман	22%
Гальваническое производство	Кислотные пары, хром(VI)	11%

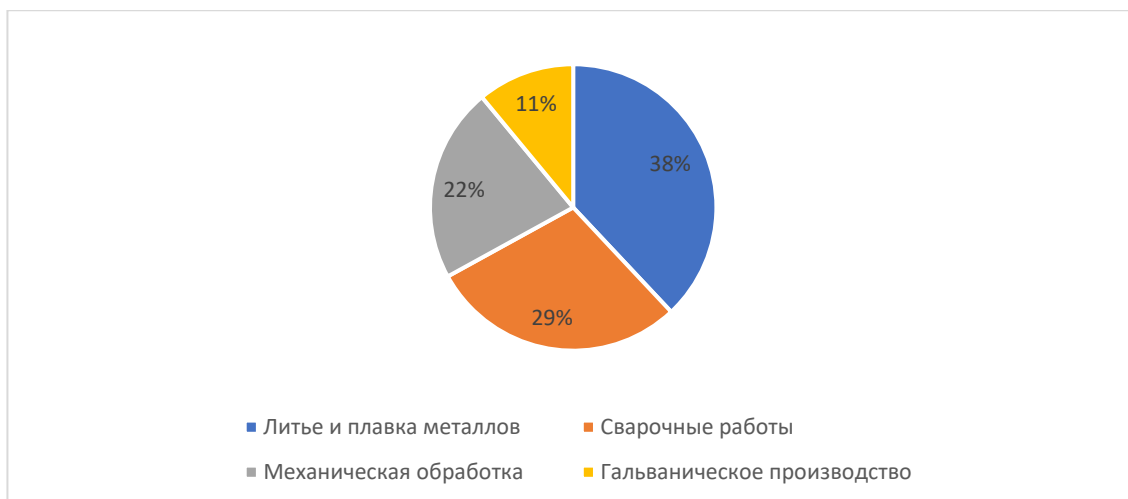


Рисунок 8. Доля в выбросах сектора технологических процессов

- Целлюлозно-бумажные предприятия как источники загрязнения атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге и Ленинградской области.

В пределах 100-километровой зоны от границ Санкт-Петербурга функционируют три крупных предприятия целлюлозно-бумажной промышленности. (см. рисунок 9 и таблицу 8) Согласно исследованиям, данные производства ответственны за 12% общего объема промышленных выбросов в атмосферный воздух региона. Особенностью их эмиссий является наличие особо опасных токсичных соединений, характерных именно для этого вида промышленной деятельности (см. таблицу 9) [9].

Ключевые предприятия:

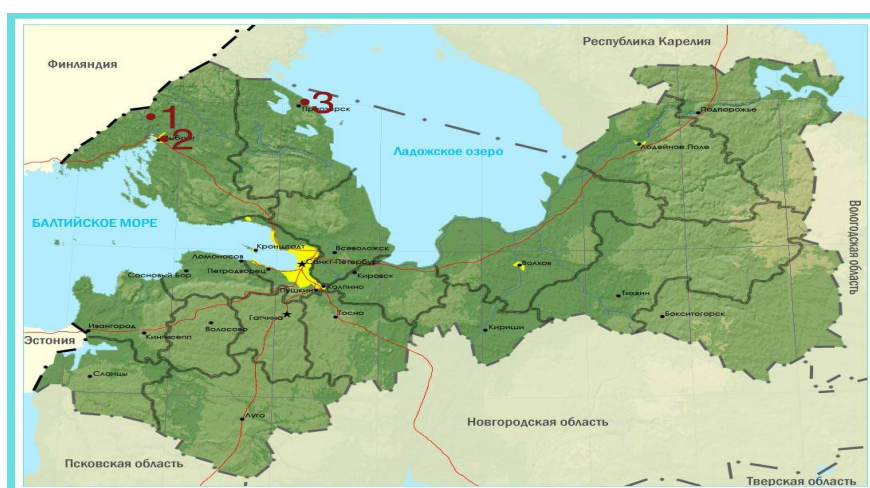


Рисунок 9. Целлюлозно-бумажные предприятия

Таблица 8. Количество выбросов целлюлозно-бумажных предприятий

Предприятие	Выбросы (тонн/год)
1) АО "Светогорск"	4 200
2) ОАО "Выборгская целлюлоза"	3 800
3) ЗАО "Приозерский ЦБК"	2 100

Таблица 9. Структура выбросов по технологическим процессам [10].

Технологический процесс	Основные загрязнители	Доля в выбросах
Варка целлюлозы	Сероуглерод, меркаптаны	45%
Отбелка	Хлорорганические соединения	28%
Сушка бумаги	Пыль целлюлозная, формальдегид	18%
Очистка сточных вод	Сероводород, аммиак	9%

Промышленные предприятия Санкт-Петербурга и прилегающих территорий Ленинградской области продолжают оставаться значимыми источниками загрязнения атмосферного воздуха, оказывая существенное влияние на экологическую обстановку региона. Среди основных промышленных кластеров особое место занимает энергетический комплекс, представленный теплоэлектроцентралями, которые формируют 59% промышленных выбросов. Основными загрязняющими веществами от ТЭЦ являются оксиды азота (28% от городских выбросов), диоксид серы (39%) и взвешенные частицы PM10 (17%), при этом наибольшая экологическая нагрузка на Выборгскую ТЭЦ и Правобережную ТЭЦ. Характерной особенностью энергетического сектора являются выраженные сезонные колебания выбросов с увеличением на 30% в

зимний период, хотя благодаря программе газификации в 2020-2023 годах удалось добиться сокращения выбросов на 12% [7].

Не менее значимый вклад в загрязнение атмосферы вносят нефтехимические предприятия, обеспечивающие 21% промышленных выбросов. Особую опасность представляют такие вещества как бензапирен, концентрации которого в районе нефтеперерабатывающих заводов достигают 6,3 ПДК, и сероводород (до 12 ПДК), при этом основными зонами экологического напряжения являются город Кириши (предприятие "КИНЕФ") и промзона "Парнас" в Санкт-Петербурге. Следует отметить, что нефтехимические производства активно участвуют в формировании фотохимического смога, хотя за последние пять лет наблюдается положительная динамика снижения содержания бензапирена в атмосфере на 27%.

Металлургические и машиностроительные предприятия, обеспечивающие 7% промышленных выбросов, характеризуются выбросами тяжелых металлов (свинец, хром, марганец) и формальдегида, причем наибольшее воздействие испытывают Колпинский район (Ижорские заводы) и Невский район (Северная верфь). Серьезной проблемой остается накопление металлов в почвах прилегающих территорий, хотя за период с 2018 по 2023 год отмечается снижение выбросов свинца на 27%.

Целлюлозно-бумажные комбинаты, дающие 12% промышленных выбросов, отличаются выбросами сероводорода (до 14 ПДК) и меркаптанов (до 23 ПДК), создающих устойчивый неприятный запах, при этом основные зоны воздействия расположены в Приозерске и Выборге с эффектом трансграничного переноса загрязнений в Курортный район Санкт-Петербурга. Благодаря модернизации производств с 2015 по 2023 год удалось добиться снижения серосодержащих выбросов на 34% [9].

Сравнительный анализ показывает, что каждому типу предприятий свойственны свои особенности загрязнения атмосферы: максимальные

превышения ПДК фиксируются по диоксиду серы (5,2 ПДК) для энергетики, бензапирену (6,3 ПДК) для нефтехимии, свинцу (5,3 ПДК) для металлургии и меркаптанам (23 ПДК) для ЦБК, при этом радиус влияния варьируется от 3-5 км для ТЭЦ до 10-15 км для целлюлозно-бумажных комбинатов. Среди ключевых экологических проблем следует выделить накопление стойких загрязнителей, трансграничный перенос вредных веществ и негативное влияние на здоровье населения, выражающееся в повышенной заболеваемости астмой (на 80% выше среднего уровня у ЦБК), онкологическими (на 15% выше в нефтехимических районах) и неврологическими (в зоне влияния металлургических предприятий) заболеваниями [7].

Несмотря на положительную динамику снижения выбросов, наблюдаемую в последние годы, промышленные предприятия остаются значимыми источниками загрязнения атмосферного воздуха, что требует продолжения работы по внедрению наилучших доступных технологий, усилению экологического контроля и разработке комплексного подхода, сочетающего технологическую модернизацию производств с совершенствованием системы экологического мониторинга и нормирования, что особенно актуально с учетом метеорологических особенностей региона, способствующих накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы.

1.2.3 Строительство и коммунальное хозяйство

Строительная деятельность и коммунальное хозяйство Санкт-Петербурга оказывают существенное воздействие на состояние воздушного бассейна города. Согласно данным мониторинга окружающей среды за 2023 год, доля этих секторов в общих выбросах загрязняющих веществ достигает 20%. Наблюдается устойчивый рост показателей, обусловленный интенсивным развитием городской застройки и инфраструктурных объектов [11].

Влияние строительной деятельности на качество атмосферного воздуха

Строительная отрасль оказывает многофакторное негативное воздействие на состояние атмосферы через различные механизмы загрязнения. Согласно исследованиям, около 60% всех выбросов данного сектора образуется при эксплуатации спецтехники - дизельных экскаваторов, бульдозеров, кранового оборудования и генераторов, совокупный годовой объем выбросов которых достигает 25 тысяч тонн вредных веществ. Особую экологическую проблему создают оксиды азота (NOx), годовой объем эмиссии которых составляет 8,5 тысяч тонн, что обусловлено использованием морально устаревшей техники, соответствующей стандартам Евро-0 - Евро-3. Наиболее выраженное воздействие наблюдается на масштабных строительных объектах, включая квартальную застройку Невского района и возведение транспортных развязок ЗСД, где одновременно эксплуатируется до 50 единиц техники [12].

Производственные мощности по изготовлению строительных материалов, расположенные в городской черте, ежегодно выбрасывают около 12 тысяч тонн загрязняющих веществ, среди которых наиболее опасны:

- Формальдегид (концентрации до 3,2 ПДК вблизи асфальтобетонных заводов)
- Мелкодисперсные частицы PM2.5 (объемом 3,8 тысячи тонн)
- Фенольные соединения и летучие органические вещества

Непосредственно строительные процессы становятся источником примерно 8 тысяч тонн пылевых выбросов ежегодно. К наиболее проблемным видам работ относятся:

- Проведение земляных работ (особенно в условиях пониженной влажности)
- Демонтажные операции с выделением асбестосодержащей пыли
- Шлифовальные и малярные операции на строительных объектах [11].

Влияние коммунального хозяйства на качество атмосферного воздуха

Сфера жилищно-коммунального хозяйства Санкт-Петербурга представляет собой существенный источник загрязнения атмосферы. В городе функционирует порядка 1,2 тысячи коммунальных котельных, которые в период отопительного сезона (октябрь-апрель) выбрасывают в атмосферу до 18 тысяч тонн вредных веществ, в том числе:

- 4,5 тысячи тонн диоксида серы
- 3,8 тысячи тонн оксидов азота
- 9 тысяч тонн углекислого газа

Особую экологическую проблему создают 120 угольных котельных установок, преимущественно расположенных в окраинных районах, которые ответственны за 65% всех выбросов SO₂ в данном секторе [2].

Парк спецтехники коммунальных служб насчитывает свыше 3 тысяч единиц (мусороуборочные машины, поливомоечный транспорт, снегоочистители) и ежегодно производит около 5 тысяч тонн загрязняющих веществ. При этом большинство (80%) транспортных средств не соответствует современным экологическим стандартам (ниже Евро-4) [5].

Деятельность по обращению с отходами сопровождается комплексными выбросами, включающими:

- До 8 тысяч тонн метана в год с территории полигонов
- Значительные выбросы сероводорода (особенно с полигона "Новосёлки")
- Образование диоксинов на мусоросжигательном заводе №1

Пространственное распределение загрязнения имеет выраженную неоднородность. Наибольшие концентрации загрязняющих веществ отмечаются:

- В Невском районе (вблизи ЖК "Лондон Парк") - превышение ПДК по PM2.5 в 3,2 раза, по формальдегиду - в 2,8 раза
- В Приморском районе (зона строительства ЗСД) - увеличение концентраций NOx до 2,8 ПДК
- В районе полигона "Новосёлки" - среднегодовые показатели сероводорода достигают 5,6 ПДК

Анализ данных выявил четко выраженную сезонную зависимость объемов выбросов. В строительной сфере максимальные показатели загрязнения атмосферы регистрируются в теплый период года (май–сентябрь), превышая зимние значения на 40%. Данная закономерность обусловлена интенсивным ведением строительно-монтажных работ при благоприятных метеорологических условиях [11].

В отличие от строительного комплекса, жилищно-коммунальное хозяйство демонстрирует противоположную динамику. Основная доля выбросов (до 75% годового объема) приходится на холодный сезон (ноябрь–март), что объясняется значительным (в 3–4 раза) увеличением тепловой нагрузки на котельные установки в отопительный период.

1.2.4 Природные факторы

Географическое положение и природные условия Санкт-Петербурга создают уникальную совокупность факторов, существенно влияющих на качество атмосферного воздуха в городе. Эти природные механизмы взаимодействуют с антропогенными выбросами, формируя сложную систему атмосферных процессов, требующую детального рассмотрения.

Климатические особенности региона определяют базовые условия для рассеивания и накопления загрязняющих веществ. Умеренно-континентальный климат с выраженным морским влиянием характеризуется следующими параметрами: среднегодовая температура составляет +5,6°С с заметными

сезонными колебаниями от -8°C в январе до $+18^{\circ}\text{C}$ в июле. Преобладающие западные и юго-западные ветра (наблюдающиеся в 65% случаев) обеспечивают в целом хорошую вентиляцию городской территории, однако этот эффект значительно варьируется по сезонам. Годовое количество осадков достигает 660 мм, при этом максимум приходится на август-сентябрь (около 80 мм в месяц), а минимум - на февраль-март (30-35 мм). Особое значение имеют частые туманы (55-60 дней в год), которые в сочетании с загрязняющими веществами формируют опасные смоговые явления [13].

Сезонная динамика атмосферных процессов в Санкт-Петербурге проявляется особенно ярко. В зимний период (декабрь-февраль) наблюдаются наиболее неблагоприятные условия для рассеивания загрязнений. Температурные инверсии, возникающие в 35-40 случаях за сезон, создают устойчивые "крышки" на высотах 150-300 метров, что приводит к аккумуляции выбросов в приземном слое. Одновременно снижается интенсивность вертикального воздухообмена - рассеивающая способность атмосферы падает в 2-3 раза по сравнению с летними месяцами. Эти факторы в сочетании с повышенными выбросами от ТЭЦ и автотранспорта формируют устойчивые периоды ухудшения качества воздуха.

Летний режим (июнь-август) характеризуется активизацией совершенно иных процессов. Увеличение солнечной радиации и температуры воздуха стимулирует фотохимические реакции между оксидами азота и летучими органическими соединениями, что приводит к образованию приземного озона - вторичного загрязнителя, концентрации которого в жаркие безветренные дни могут достигать 1,8-2,3 ПДК. Одновременно биогенные выбросы растительности (пыльца, споры, фитонциды) создают дополнительную нагрузку на атмосферу, особенно ощутимую для аллергиков.

Переходные сезоны (весна и осень) отличаются повышенной ветровой активностью, которая может как способствовать рассеиванию загрязнений, так и

вызывать новые проблемы. Весенние пыльные бури при восточных ветрах поднимают в атмосферу огромное количество частиц почвы и строительной пыли, создавая кратковременные, но интенсивные эпизоды загрязнения PM10 до 5-7 ПДК. Осенние циклоны приносят обильные осадки, которые хотя и очищают атмосферу, но могут способствовать образованию кислотных дождей при взаимодействии с промышленными выбросами [14].

Естественные источники загрязнения вносят значительный вклад в общий баланс атмосферных примесей. Растительность города и окрестностей, особенно хвойные леса и парковые зоны, выделяют летучие органические соединения (изопрен, терпены) в объемах до 12 000 тонн за теплый сезон. Эти биогенные вещества участвуют в сложных фотохимических реакциях, формируя вторичные органические аэрозоли, которые составляют до 15-20% от общего объема взвешенных частиц в летний период [15].

Почвенная и дорожная пыль представляет собой другой важный природный источник загрязнения. Весеннее таяние снега обнажает значительные площади оголенных грунтов, особенно в промышленных зонах и на строительных площадках. При скорости ветра свыше 7-8 м/с начинаются интенсивные пылевые подъемы, продолжающиеся обычно 3-5 дней и охватывающие обширные территории. Аналогичные процессы наблюдаются в районах расположения песчаных карьеров и неукрепленных откосов.

Особую роль играют морские аэрозоли, поступающие с акватории Финского залива. Эти частицы, содержащие хлориды, сульфаты и соединения йода, особенно активны в штормовые периоды (октябрь-декабрь), когда их концентрации в прибрежных районах (Кронштадт, Сестрорецк, Лахта) могут увеличиваться в 4-5 раз по сравнению с фоновыми значениями. Эти соли не только влияют на качество воздуха, но и ускоряют коррозию городской инфраструктуры [15].

Трансграничный перенос загрязнений представляет собой серьезную проблему для Санкт-Петербурга. В зависимости от направления воздушных масс город получает значительные объемы загрязняющих веществ с территории соседних регионов и стран. Юго-восточные ветра приносят сернистые соединения от эстонских электростанций (вклад до 12-15% по SO₂), юго-западные - озон и летучие органические соединения с финских химических предприятий (8-10% по озону). Особую опасность представляют восточные воздушные потоки в периоды лесных пожаров в Ленинградской области и Карелии, когда доля трансграничного переноса PM_{2.5} может достигать 30% от общего объема загрязнения [16].

Влияние Балтийского моря и Финского залива на атмосферные процессы в городе многогранно. Морские бризы создают суточную циркуляцию воздушных масс: дневные потоки с залива способствуют рассеиванию загрязнений, в то время как ночные береговые ветра могут вызывать их накопление в отдельных районах. Частые туманы (особенно осенью) взаимодействуют с промышленными выбросами, образуя устойчивые влажные аэрозоли, которые значительно ухудшают видимость и усугубляют воздействие на дыхательную систему [15].

Ландшафтные особенности Санкт-Петербурга также вносят свой вклад в специфику атмосферных процессов. Низменный рельеф (1-3 метра над уровнем моря) и отсутствие естественных орографических преград способствуют свободному перемещению воздушных масс, однако это же приводит к "продуваемости" города, когда загрязнения быстро распространяются на большие расстояния. Водные объекты - Нева, многочисленные каналы и водохранилища - создают локальные микроклиматические условия, влияющие на распределение загрязнений. В то же время зеленые зоны города выполняют важную фильтрующую функцию, поглощая до 20% взвешенных частиц и существенно улучшая качество воздуха в своих окрестностях [16].

Метеорологические экстремумы, участившиеся в последние годы, значительно усиливают негативное воздействие природных факторов. Антициклональные блокирования, продолжительностью до 14-18 дней, создают условия для многократного (в 4-5 раз) роста концентраций PM_{2.5}. Температурные инверсии, наблюдающиеся 45-50 раз в год, формируют устойчивые "крышки", препятствующие вертикальному перемешиванию воздуха. Штормовые ветра скоростью свыше 15 м/с поднимают в атмосферу огромное количество пыли и аэрозолей, создавая кратковременные, но интенсивные пики загрязнения.

Воздействие на здоровье населения этих природных факторов особенно заметно в сочетании с техногенными выбросами. Комбинированные эффекты (например, взаимодействие влажности с SO₂ с образованием кислотных аэрозолей или фотохимические реакции с участием NO_x) значительно усиливают негативные последствия. Сезонные риски распределяются следующим образом: зимой преобладают респираторные заболевания (+30% к среднему уровню), весной - аллергические реакции (+45%), летом - обострения сердечно-сосудистых патологий (+25%). Наиболее уязвимыми группами являются дети (чувствительность в 2,3 раза выше), пожилые люди (+40% риска осложнений) и астматики (+60% частоты приступов) [13].

1.3 Количественная характеристика выбросов загрязняющих веществ

Анализ количественных показателей выбросов загрязняющих веществ в атмосферу Санкт-Петербурга позволяет оценить масштабы антропогенного воздействия на воздушную среду города. Данные, представленные Комитетом по природопользованию и другими источниками, свидетельствуют о значительном вкладе различных секторов экономики в общий объем загрязнения.

Согласно подсчётам за 2023 год, общий объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу Санкт-Петербурга составил порядка 300 тысяч тонн. Основными источниками выбросов являются (см.рис.10):

- Автомобильный транспорт – 48% (около 140 тысяч тонн);
- Промышленные предприятия – 27% (около 80 тысяч тонн);
- Строительство и коммунальное хозяйство – 20% (около 60 тысяч тонн).
- Природные факторы – 5% (около 15 тысяч тонн)

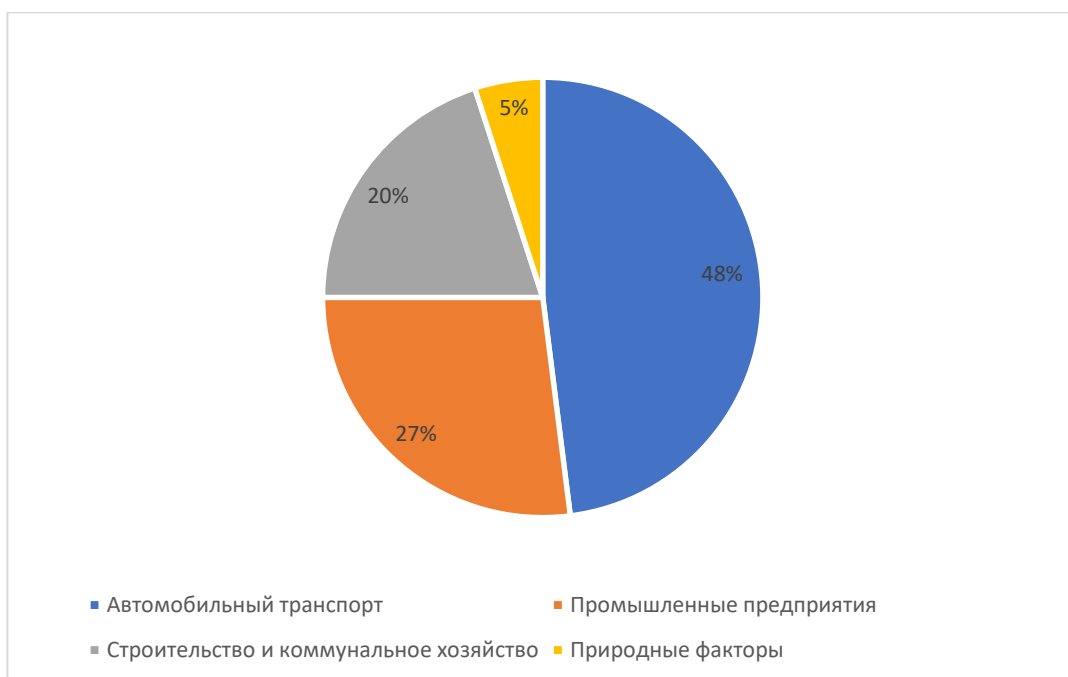


Рисунок 10. Основные источники выбросов

Структура выбросов от автомобильного транспорта

Автотранспорт является доминирующим источником загрязнения, обеспечивая более 48% выбросов. Основные загрязняющие вещества и их объемы: угарный газ (CO) – 65%; оксиды азота (NO_x) – 15% от транспортных выбросов; взвешенные частицы (PM10 и PM2.5) – 10%; летучие органические соединения (ЛОС) – 10% [5].

Промышленные выбросы: распределение по отраслям. Промышленный сектор Санкт-Петербурга вносит значительный вклад в загрязнение атмосферы. Структура выбросов по отраслям: энергетика (ТЭЦ, котельные) – 59% (50 тысяч тонн); основные загрязнители: SO_2 (39%), NO_x (28%), зола (17%). Нефтепереработка и химия – 21% (17 тысяч тонн); основные загрязнители: бензол, формальдегид, сероводород. Metallургия и машиностроение – 7% (6,5 тысяч тонн); основные загрязнители: тяжелые металлы (Pb, Cd, Ni), пыль. Целлюлозно-бумажная промышленность – 12% (10 тысяч тонн).

Строительство и коммунальное хозяйство. Данные сектора обеспечивают 20% выбросов, при этом их объемы растут из-за активной городской застройки. Основные источники: строительная техника – 59% выбросов сектора (37 тысяч тонн); основные загрязнители: NO_x (8,5 тысяч тонн), $\text{PM}_{2.5}$ (3,8 тысяч тонн). Коммунальные котельные – 41% выбросов сектора (26 тысяч тонн); основные загрязнители: SO_2 (4,5 тысяч тонн), NO_x (3,8 тысяч тонн) [11].

Основные природные источники и их вклад: биогенные выбросы (растительность) – объем: ~10 тыс. тонн в теплый сезон (май–сентябрь); основные вещества: летучие органические соединения (ЛОС) – изопрен, терпены. Почвенная и дорожная пыль – объем: ~2–3 тыс. тонн в год (пик весной); основные вещества: взвешенные частицы (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$). Морские аэрозоли (Финский залив) – объем: ~1 тыс. тонн в год (максимум в штормовые периоды); основные вещества: хлориды, сульфаты, йодиды. Трансграничный перенос загрязнений – объем: до 3–5 тыс. тонн в год (в зависимости от направления ветра); основные вещества: SO_2 (12–15% от фонового уровня) – от эстонских ТЭЦ; озон и ЛОС (8–10%) – из Финляндии; $\text{PM}_{2.5}$ (до 30% в периоды лесных пожаров в Ленобласти и Карелии).

1.4 Сезонные колебания загрязнения

Качество атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге подвержено значительным сезонным колебаниям, обусловленным сложным

взаимодействием природно-климатических факторов, антропогенного воздействия и специфики городской застройки. В течение года наблюдаются существенные изменения в составе и концентрации загрязняющих веществ, что требует тщательного изучения особенностей каждого сезона.

В зимние месяцы (декабрь-февраль) складываются наиболее неблагоприятные условия для рассеивания вредных примесей. Среднесезонная температура воздуха составляет $-5,8^{\circ}\text{C}$ с колебаниями от -3°C до -12°C , при этом температурные инверсии фиксируются в 65% случаев. Эти метеоусловия способствуют накоплению загрязнений в приземном слое, что приводит к значительному росту концентраций взвешенных частиц: $\text{PM}_{2.5}$ достигает 28-32 $\text{мкг}/\text{м}^3$ (что в 2,3 раза превышает летние показатели), а PM_{10} - 42-48 $\text{мкг}/\text{м}^3$, с пиковыми значениями до 65 и 98 $\text{мкг}/\text{м}^3$ соответственно. Особенно выражено увеличение содержания диоксида серы (на 180-220%), основными источниками которого являются угольные теплоэлектроцентрали (58% выбросов) и частный жилой сектор (22%). Параллельно отмечается рост концентраций оксида углерода (на 150-170%), поступающего преимущественно от автомобильного транспорта (63%) и котельных установок (27%). Наибольшие уровни загрязнения регистрируются в Центральном, Выборгском и Калининском районах, тогда как минимальные - в прибрежных Курортном и Петродворцовом районах.

Весенний период (март-май) характеризуется изменением структуры атмосферного загрязнения. При средней температуре $+3^{\circ}\text{C}$ (колебания от -5°C до $+15^{\circ}\text{C}$) и увеличении повторяемости восточных ветров (до 35%) формируются условия для возникновения интенсивных пылевых явлений продолжительностью 3-7 дней, когда концентрации PM_{10} могут достигать 7-9 ПДК. Основными источниками пылеобразования выступают оголенные после снеготаяния поверхности и активизировавшиеся строительные площадки. Одновременно фиксируется рост содержания аммиака (на 70-80%), поступающего с сельхозугодий Ленинградской области и достигающего 3,1

ПДК, а также формальдегида (увеличение на 40-50%), связанного с началом активной фазы строительного сезона. Существенную проблему представляет усиление аллергенной нагрузки за счет пыльцы растений, что особенно негативно сказывается на самочувствии чувствительных групп населения.

Летние месяцы (июнь-август) отличаются принципиально иным характером загрязнения атмосферы. При средней температуре $+18^{\circ}\text{C}$ (диапазон $+12^{\circ}\text{C} \dots +28^{\circ}\text{C}$) и преобладании западных ветров (70%) на первый план выходят процессы фотохимического преобразования загрязнителей. Фоновые концентрации приземного озона составляют $45-55 \text{ мкг/м}^3$, а в периоды смоговых явлений могут достигать 160 мкг/м^3 (1,8 ПДК), особенно в периферийных районах города. Наблюдается резкое увеличение содержания летучих органических соединений: биогенные компоненты (изопрен, терпены) возрастают на 300%, тогда как антропогенные (бензол, толуол) - на 25%. Значительное ухудшение качества воздуха связано также с высокой концентрацией пыльцы и спор растений (до 5000 зерен/м^3), с преобладанием аллергенов березы, злаковых культур и полыни. Дополнительными негативными факторами выступают усиленные испарения с водных поверхностей, активизация строительных работ и трансграничный перенос продуктов горения от лесных пожаров.

Осенний сезон (сентябрь-ноябрь) знаменует постепенный переход к зимнему типу загрязнения атмосферы. При понижении температуры от $+10^{\circ}\text{C}$ до -3°C , высокой относительной влажности (85-90%) и учащении туманов (12-15 случаев за сезон) отмечается устойчивый рост концентраций взвешенных частиц (на 20-25% ежемесячно) с характерным осенним составом (сажа, сульфаты, нитраты). Содержание диоксида азота увеличивается на 35-40% в связи с началом отопительного периода, а уровень сероводорода достигает максимальных значений до 4,3 ПДК из-за процессов разложения органических отходов на полигонах ТКО. Особую опасность представляют участвовавшие

туманы, которые, взаимодействуя с загрязнителями, образуют устойчивые кислотные аэрозоли, а также органическая пыль от разлагающейся листвы [13].

Анализ среднесезонных концентраций основных загрязняющих веществ выявляет четкую цикличность: максимальные уровни PM_{2.5} (30 мкг/м³), NO₂ (48 мкг/м³), SO₂ (35 мкг/м³) и CO (1,8 мг/м³) регистрируются зимой, тогда как летом доминирует озон (55 мкг/м³), а весенний и осенний периоды характеризуются промежуточными значениями.

Сезонные особенности загрязнения воздуха оказывают непосредственное влияние на здоровье горожан. В зимний период отмечается рост обострений бронхиальной астмы (+45%) и сердечно-сосудистых патологий (+30%). Весной резко увеличивается количество случаев аллергического ринита (+60%) и конъюнктивита (+40%). Летом проявляются респираторные симптомы (+25%) и последствия фотохимического воздействия (+35%). Осенью учащаются обострения хронической обструктивной болезни легких (+40%) и бронхитов (+50%) [8].

Для минимизации сезонного воздействия разрабатываются специализированные мероприятия: зимой - усиленный контроль за работой ТЭЦ и ограничение использования угля; весной - реализация программ по пылеподавлению; летом - система оповещения о фотохимическом смоге; осенью - интенсификация уборки листвы и подготовка к отопительному периоду. Перспективными направлениями научных исследований являются разработка сезонных моделей загрязнения, создание адаптивных систем мониторинга и совершенствование методов прогнозирования неблагоприятных эпизодов [14].

Таким образом, сезонная изменчивость качества атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге представляет собой сложную, но прогнозируемую систему, требующую дифференцированного подхода к организации мониторинга и управлению качеством воздушной среды в течение всего года. Глубокое понимание этих закономерностей имеет принципиальное значение для

разработки эффективных природоохранных стратегий и защиты здоровья городского населения.

2. Анализ метеорологических условий, влияющих на уровень загрязнения воздуха

Качество воздуха в Санкт-Петербурге определяется сложным взаимодействием антропогенных выбросов и местных метеорологических условий, среди которых особую роль играют синоптические процессы, влияющие на распределение и трансформацию загрязняющих веществ. Поступающие в атмосферу примеси подвергаются переносу и рассеиванию согласно законам турбулентной диффузии, при этом их концентрация зависит от множества факторов: гравитационного осаждения крупных частиц, химических и фотохимических реакций между различными компонентами, дальнего переноса воздушными массами и вымывания осадками. Ключевыми метеорологическими параметрами, определяющими уровень загрязнения, являются скорость и направление ветра, наличие температурных инверсий и изотермических слоев, температурный режим, облачность и туманы [3].

При стабильных объемах выбросов эти факторы могут вызывать значительные колебания концентрации загрязнений в приземном слое — вплоть до десятикратных изменений. Исторические примеры (такие как инциденты в долине Мааса в 1930 г., Доноре в 1948 г., Лондонский смог 1952 г. и Нью-Йорк 1966 г.) показывают, что сочетание высоких выбросов с неблагоприятными метеоусловиями способно приводить к резкому ухудшению качества воздуха и серьезным последствиям для здоровья населения.

Для Санкт-Петербурга, где часты температурные инверсии, высокая влажность и слабые ветры, особенно важно учитывать способность атмосферы к рассеиванию и самоочищению. Решение задач по улучшению качества воздуха требует комплексного подхода, включающего анализ метеорологических условий, моделирование процессов переноса загрязнений и разработку мер, направленных на снижение выбросов в периоды неблагоприятной погодной обстановки. Понимание этих механизмов необходимо для эффективного

управления экологической ситуацией в городе и минимизации рисков для здоровья жителей.

2.1 Температура воздуха и температурные инверсии

Основной элемент климата – температурный режим воздуха (см. табл.10 и рис.11). Данные наблюдений показывают, что средняя температура воздуха в Санкт-Петербурге составляет +7,2 °С. Самым холодным месяцем является декабрь (средняя температура -4,4 °С), самым теплым месяцем –август (средняя температура +19,9 °С). Амплитуда среднесуточных температур декабря и августа (24,3 °С) невелика и говорит об умеренном петербургском климате. Самая высокая температура в Санкт-Петербурге отмечалась в августе 2010 года (+37,1 °С), самая низкая –в январе 1983 года (-35,9°С). В среднем продолжительность периода, когда среднесуточная температура является положительной, составляет 220 дней [17].

Таблица 10. Средний и абсолютные температурные показатели в Санкт-Петербурге за 2023 год.

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Самый теплый, °С	+4.2	+3.3	+10.3	+21.5	+23.7	+27.8	+27.5	+32.4	+24.5	+17.1	+11.7	+3.7
Самый холодный °С	-17.0	-15.9	-16.8	-3.1	-0.3	+3.7	+10.4	+11.3	+7.9	-3.4	-13.0	-16.6
Среднее значение температуры, °С	-2.3	-3.0	-0.3	+6.8	+12.0	+17.3	+18.2	+19.9	+16.4	+5.0	+0.1	-4.4

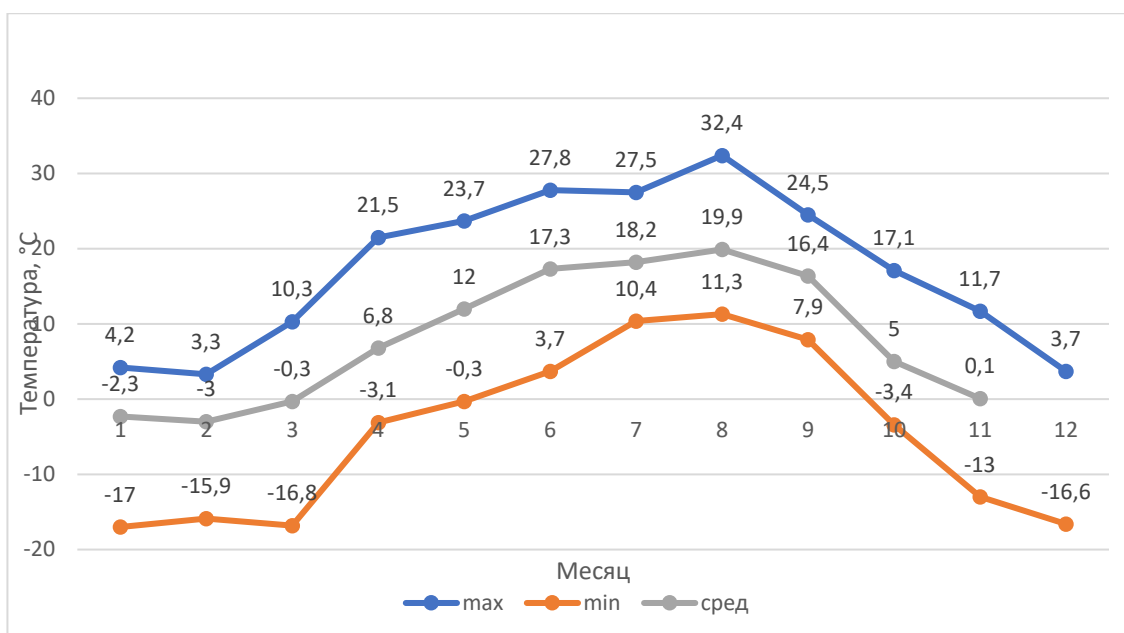


Рисунок 11. Средний и абсолютные температурные показатели в Санкт-Петербурге за 2023 год.

Зимний сезон в Санкт-Петербурге отличается умеренными температурами благодаря смягчающему влиянию Балтийского моря. Для данного региона характерен плавный переход к отрицательным температурам - похолодание обычно происходит постепенно, с ежесуточным понижением температуры на 1-2°C. Экстремально низкие температуры наблюдаются редко, средnezимние показатели обычно не опускаются ниже -5...-7°C. Также стоит отметить отсутствие сильных ветров в холодный период [1].

Температурный режим и степень загрязнения приземного атмосферного слоя находятся в тесной взаимосвязи. Начиная с XX века, в условиях активного промышленного роста большинства городов, отмечается устойчивое превышение температуры в урбанизированных зонах по сравнению с окружающими территориями. В пределах одного города в один и тот же момент времени могут наблюдаться значительные температурные колебания. Максимальные значения обычно фиксируются в центральных районах, тогда как по мере удаления к периферии происходит постепенное снижение (изолинии

температурного градиента при этом следуют вдоль городской границы). При изменении направления ветрового потока ядро тепловой аномалии (известной как "тепловой остров") смещается в сторону, противоположную движению воздушных масс.

Основным фактором формирования "теплового острова" служит высокая концентрация аэрозольных частиц, приводящая к изменению радиационного баланса. В условиях городской среды происходит накопление продуктов сгорания, сажи, промышленных выбросов и других загрязнителей, которые поглощают солнечное излучение, создавая дополнительный тепловой эффект. Наиболее выражена разница температур между центром и окраинами в ночные и предрассветные часы, тогда как в дневное время этот контраст минимизируется или даже меняет знак [18].

Тепловая аномалия инициирует циркуляцию воздушных масс от периферии к центру, способствуя притоку относительно чистого воздуха с окраин. Повышение концентрации загрязняющих веществ в холодный период года коррелирует с температурным ростом не только в условиях атмосферного застоя. Увеличение содержания примесей может наблюдаться и при слабых ветрах. Следует отметить, что на распределение загрязнений влияет не только горизонтальная, но и вертикальная температурная стратификация атмосферы.

Влияние температуры воздуха на уровень загрязнения представлено в табл. 11.

Таблица 11. Средние значения концентраций загрязняющих веществ в пределах разных диапазонов температур в холодный и теплый периоды

№	Диапазон Т°С	Холодный период				№	Диапазон Т°С	Теплый период			
		СО, мг/м ³	NO, мкг/м ³	NO ₂ , мкг/м ³	PM ₁₀ , мкг/м ³			СО, мг/м ³	NO, мкг/м ³	NO ₂ , мкг/м ³	PM ₁₀ , мкг/м ³
1	-25÷-20	1,05	110,20	52,80	58,20	5	<5	0,42	50,15	27,90	13,20
2	-20÷-15	0,82	95,60	54,30	44,80	6	0÷5	0,43	29,80	30,10	13,10
3	-15÷-10	0,76	94,50	53,20	31,80	7	5÷10	0,54	38,40	28,70	22,90
4	-10÷-5	0,63	68,90	50,60	23,40	8	10÷15	0,47	50,10	25,40	19,30
5	-5÷0	0,61	58,20	49,10	17,80	9	15÷20	0,52	41,20	30,80	21,70
6	0÷5	0,72	76,40	43,70	23,90	10	20÷25	0,44	17,80	25,20	24,80
7	5÷10	0,78	75,20	47,50	29,10	11	25÷30	0,51	26,40	30,90	37,80
						12	>30	0,48	24,0	29,5	40,2

Анализ данных, представленных в таблицах, позволяет выявить сезонные особенности загрязнения атмосферного воздуха. Наибольшие концентрации вредных веществ, как правило, регистрируются в холодное время года, за исключением случаев экстремальной жары (температура выше +30°С), когда отмечается резкий рост содержания взвешенных частиц PM₁₀ [13][19].

В зимний период пиковые значения загрязнения тремя из четырёх исследуемых веществ (оксидом углерода, оксидом азота и PM₁₀) фиксируются при температурах ниже -20°С. При этом концентрация оксида азота в таких условиях может превышать среднесуточную ПДК почти в два раза. По мере потепления наблюдается постепенное снижение уровня загрязнения с достижением минимальных значений в диапазоне от -5 до 0°С. Дальнейший рост температуры приводит к незначительному увеличению концентраций большинства загрязнителей (за исключением NO₂). Особенностью диоксида азота является смещение его экстремальных значений примерно на 5°С в сторону более высоких температур, что указывает на сложный, нелинейный характер зависимости между температурой воздуха и концентрацией этого вещества.

В тёплый сезон динамика загрязнения воздуха существенно отличается. Чёткой корреляции между температурой и концентрацией исследуемых веществ не прослеживается. Незначительные колебания уровней загрязнения наблюдаются вплоть до достижения $+30^{\circ}\text{C}$. Особый интерес представляет сравнение концентраций в одинаковых температурных диапазонах (от -5 до $+10^{\circ}\text{C}$), где различия в содержании загрязнителей обусловлены преимущественно сезонными факторами, а не температурными условиями. Это подтверждает существенное влияние сезонности на процессы формирования уровня загрязнения атмосферного воздуха.

Температурные инверсии

В метеорологии инверсия представляет собой аномальное изменение температуры с высотой, при котором вместо характерного для тропосферы понижения температуры наблюдается её рост. Это явление играет ключевую роль в формировании неблагоприятных экологических условий в городской среде, особенно в крупных промышленных центрах, таких как Санкт-Петербург. Различают два основных типа инверсий: приземные, образующиеся у поверхности земли с толщиной слоя в десятки метров, и инверсии в свободной атмосфере, охватывающие сотни метров [20].

Физическая природа инверсии заключается в подавлении вертикального перемешивания воздуха, что приводит к образованию устойчивых слоёв, препятствующих рассеиванию загрязняющих веществ. В результате в приземном слое накапливаются аэрозоли, газы и другие примеси, способствуя формированию смога, густых туманов и повышенных концентраций вредных веществ. Интенсивность и частота инверсий зависят от местных особенностей рельефа, наличия водных объектов, а также антропогенной нагрузки.

Многочисленные исследования подтверждают, что инверсионные условия значительно ухудшают качество воздуха в городах. Приземные и приподнятые инверсии ограничивают турбулентный обмен, что приводит к застою

загрязнений в нижних слоях атмосферы. В Санкт-Петербурге, где промышленные выбросы и транспортные эмиссии создают значительную нагрузку на окружающую среду, инверсии становятся одним из ключевых факторов, обуславливающих периоды экологического неблагополучия. В Санкт-Петербурге за 2023 год процент повторяемости приземных инверсий составил 31,5%, а приподнятых 60% [3].

Особую опасность представляют продолжительные инверсии в холодное время года, когда сочетание низких температур, слабого ветра и устойчивой стратификации атмосферы способствует накоплению взвешенных частиц (PM_{2.5}, PM₁₀), диоксида азота (NO₂), оксида углерода (CO) и других вредных веществ. В таких условиях даже умеренные выбросы могут приводить к значительному ухудшению качества воздуха, что негативно сказывается на здоровье населения.

Таким образом, температурные инверсии являются важным метеорологическим фактором, влияющим на уровень загрязнения атмосферы в Санкт-Петербурге.

2.2 Направление и скорость ветра

Формирование ветрового режима в Санкт-Петербурге находится под значительным влиянием двух ключевых факторов: близости Финского залива и особенностей городской застройки. Направление и скорость воздушных потоков подвержены заметным колебаниям, что обусловлено как плотностью городской инфраструктуры, так и её пространственной организацией.

Преобладающими в течение года являются ветры западного, южного и юго-западного направлений (табл.12 и рис.12). Согласно статистическим данным, их суммарная повторяемость составляет более 50% от общего числа случаев [17].

Таблица 12. Повторяемость направлений ветров, %

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
С	5,5	5,4	7,1	9,6	9,6	8,1	5,6	6,7	6,9	4,9	6,4	3,4	6,6
СВ	8,3	7,0	5,6	16,8	10,5	11,8	5,1	9,7	6,2	5,8	9,1	5,3	8,4
В	17,5	13,8	11,1	8,4	9,7	8,5	7,1	13,6	16,7	13,6	18,5	28,8	13,9
ЮВ	2,7	4,1	2,2	2,2	2,2	2,8	1,9	3,3	5,0	2,7	2,8	4,3	3,0
Ю	19,5	17,2	13,9	12,2	8,5	6,7	11,5	13,6	14,9	23,7	20,8	20,2	15,2
ЮЗ	19,8	18,7	25,7	19,6	16,9	16,9	26,4	16,7	13,8	21,5	16,1	14,5	18,9
З	12,3	14,0	16,2	14,8	21,3	23,3	24,5	14,7	11,0	10,0	10,3	9,8	15,2
СЗ	5,9	8,4	6,9	5,3	7,9	6,2	5,3	3,6	10,5	8,8	9,7	7,3	7,2
Штиль	8,6	11,5	11,3	11,1	12,6	15,7	12,5	18,1	15,1	9,0	6,4	6,6	11,5

В Приложении представлены розы ветров для теплого и холодного периода, всех сезонов (месяцев) года.

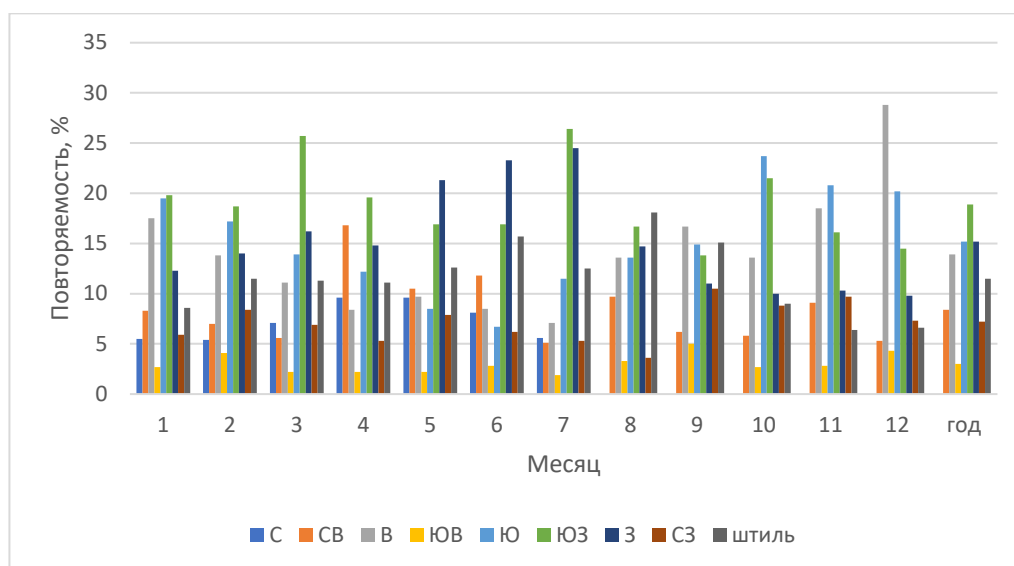


Рисунок 12. Повторяемость направлений ветров, %

Ветровая обстановка в Санкт-Петербурге формируется под влиянием общей циркуляции атмосферы и особенностей расположения барических центров в регионе. Характерной чертой атмосферного давления в этом районе является выраженная сезонная изменчивость. В зимний период преобладает пониженное давление, обусловленное влиянием Исландского минимума, тогда как летом над холодными северными морями устанавливается область повышенного давления. Благодаря воздействию субтропического антициклона,

в городе преобладают ветры юго-западного направления, что типично для большинства районов мегаполиса.

В условиях резкой сезонной смены барических полей циркуляция воздушных масс приобретает муссонные черты. Постоянство ветрового режима и интенсивность воздушных потоков определяются силой атмосферной циркуляции. Многолетние наблюдения показывают, что в Санкт-Петербурге на протяжении всего года доминируют ветры южного, юго-западного и западного направлений, совокупная повторяемость которых превышает 50%, что наглядно демонстрируют розы ветров (см. Приложение). Наибольшая повторяемость этих направлений отмечается в холодный сезон.

Зимой, вследствие близкого расположения областей высокого и низкого давления, формируются значительные горизонтальные барические градиенты. Это обуславливает повышенную устойчивость ветров по направлению и их максимальную интенсивность. В летний период, при уменьшении термических контрастов, барическое поле становится менее выраженным, а перепады давления – незначительными [21].

Направление ветра влияет на загрязнение воздуха, так как определяет, в какую сторону переносятся выбросы от источников. Преобладающими в течение года являются ветры западного, южного и юго-западного направлений. Наиболее выраженная зависимость концентрации вредных веществ от направления воздушных потоков наблюдается в случаях, когда основные источники загрязнения расположены за пределами городской черты. Однако взаимосвязь между розой ветров и уровнем загрязнения атмосферы в условиях мегаполиса отличается сложным характером. Это обусловлено несколькими факторами: во-первых, естественное движение воздушных масс подвергается значительным изменениям под воздействием городской застройки, акваторий и особенностей рельефа местности; во-вторых, тепловое излучение от промышленных объектов создает дополнительные конвекционные потоки.

Санкт-Петербург, без учёта пригородных территорий, расположен между 59°48' (район Авиагородка) и 60°05' северной широты (промзона Парнас), занимая северо-западную часть России в пределах Приневской низменности. Город имеет уникальное географическое положение, включающее побережье Невской губы Финского залива в районе устья реки Невы и многочисленные острова её дельты. Особенностью промышленного размещения является концентрация около 70% производственных мощностей в полупериферийной зоне, где наиболее развита промышленность южных районов, представленная крупными предприятиями тяжёлого машиностроения, химической и лёгкой промышленности. Северные и восточные промышленные зоны обладают меньшим производственным потенциалом [1].

Скорость ветра в большей степени, чем его направление, зависит от местных условий. Минимальные значения скорости регистрируются в лесных массивах, тогда как близость крупных водоемов способствует ее увеличению. Наибольшие показатели скорости ветра характерны для прибрежных метеостанций и станций, расположенных вблизи озер.

Климатические наблюдения за ветровым режимом Санкт-Петербурга показывают, что на большей части территории города в течение всего года преобладают слабые ветры со скоростью от 0 до 5 м/с (см. табл. 13 и рис. 13). Сильные ветры фиксируются в 6–9% случаев в холодный сезон, а в тёплый период их повторяемость падает до 1%, причём они могут отсутствовать в отдельные годы. Особый интерес представляют экстремальные ветровые явления (скорость более 15 м/с), частота которых существенно варьируется в зависимости от местоположения: в центральных районах города такие порывы отмечаются в среднем не более 2 дней в году, тогда как в прибрежных зонах их количество возрастает до 14–22 дней. Наибольшая повторяемость сильных ветров характерна для открытых территорий и акваторий, тогда как в густонаселённых районах, а также в зонах, защищённых холмами или застройкой, их интенсивность заметно снижается. Согласно данным Северо-

Западного управления гидрометеорологической службы за 1966 год, максимальное число дней с сильным ветром приходится на февраль, март, ноябрь и декабрь, а их годовое количество в среднем достигает 48 [17].

Таблица 13. Средняя и максимальная скорость ветра в Санкт-Петербурге за 2023 год.

Скорость ветра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднее значение, м/с	2,2	2,1	1,9	2,0	1,8	1,6	1,8	1,5	1,7	2,1	2,1	2,1
Максимальное значение, м/с	13,0	14,0	13,0	13,0	15,0	11,0	13,0	11,0	16,0	15,0	14,0	13,0

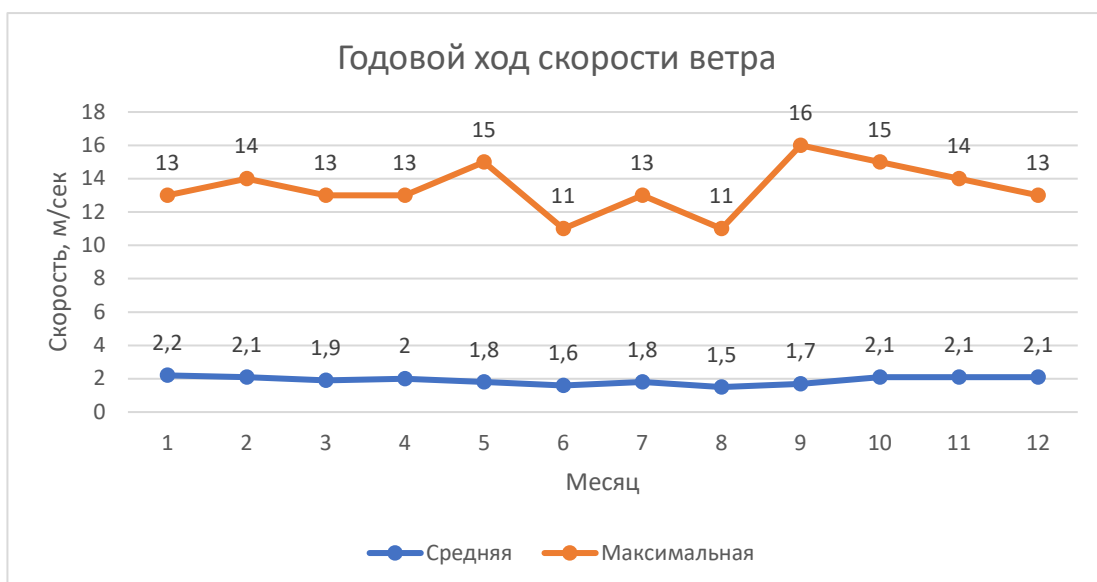


Рисунок 13. Средняя и максимальная скорость значений ветра за 2023 год.

Основным фактором, определяющим уровень загрязнения атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге и его окрестностях, выступает скорость ветра, которая оказывает комплексное влияние на перенос и рассеивание загрязняющих веществ. Скорость ветра непосредственно определяет интенсивность адвективного переноса примесей, одновременно существенно влияя на процессы турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы. Эти два взаимосвязанных механизма - горизонтальный перенос и вертикальное перемешивание - формируют пространственно-временное распределение

концентраций загрязняющих веществ в городской среде. Особенно важную роль играет турбулентная диффузия, которая в значительной степени зависит от скорости ветра и определяет изменчивость концентраций примесей во времени. В условиях мегаполиса данный фактор приобретает особое значение, поскольку влияет как на приток загрязняющих веществ извне, так и на их перераспределение в пределах городской застройки [13].

Современные исследования специалистов подтверждают существование обратной зависимости между скоростью ветра и степенью загрязнения атмосферы. Данная взаимосвязь проявляется в городских условиях сложным и неоднозначным образом.

При увеличении скорости воздушных потоков наблюдается более эффективное рассеивание загрязняющих веществ в атмосферном слое. Однако при достижении скоростного диапазона 4-7 м/с отмечается противоположный эффект - возрастает вклад высоких источников выбросов в общее загрязнение воздуха. В условиях штилевой погоды основное негативное воздействие оказывают многочисленные низкие источники загрязнения.

Наиболее неблагоприятными с экологической позиции являются всё-таки метеорологические условия со скоростью ветра 1-3 м/с, способствующие накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, но парадоксальным образом снижение скорости ветра способствует вертикальному подъему перегретых выбросов, что особенно заметно при полном отсутствии ветра. Этот процесс приводит к уменьшению концентрации вредных веществ в приземном слое атмосферы, несмотря на общее ухудшение условий рассеивания.

Исходя из всего вышеперечисленного можно сделать выводы, что ситуация неоднозначная. При скорости ветра 1-3 м/с накапливаются загрязняющие вещества в приземном слое, но парадоксальным образом снижение скорости ветра способствует вертикальному подъему перегретых выбросов, что особенно заметно при полном отсутствии ветра, а при скорости

ветра 4-7 метра возрастает вклад высоких источников выбросов в общее загрязнение воздуха. В Санкт-Петербурге средняя скорость ветра за год 2 м/с, следовательно идёт накопление веществ в приземном слое.

2.3 Облака и осадки

Облачный покров представляет собой ключевой элемент, определяющий погодные условия и климатические особенности региона. Изучение характеристик облачности имеет существенное значение для различных сфер деятельности, включая промышленность, сельское хозяйство и транспортную отрасль. В условиях Санкт-Петербурга наблюдаются выраженные сезонные изменения облачности, обусловленные циркуляционными процессами в атмосфере. Для города характерно преобладание пасмурной погоды с показателями общей облачности 8-10 баллов, что отмечается до 177 дней в течение года. Особый интерес представляет высокая повторяемость (48%) слоисто-кучевых облаков, максимальная частота образования которых приходится на период с сентября по январь.

Данный тип облачности оказывает значительное влияние на радиационный баланс и процессы рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере. Анализ динамики облачного покрова позволяет лучше понять механизмы формирования неблагоприятных метеорологических условий, способствующих накоплению вредных примесей в приземном слое воздуха.

В летний период в Санкт-Петербурге наблюдается значительная доля кучевых облаков, составляющая 25-30% от общего облачного покрова. Климатические условия города характеризуются повышенной влажностью - в среднем 145 дней в году относительная влажность воздуха превышает 80% (см.табл.14 и рис.14). Такие условия способствуют частому образованию туманов, которые регистрируются примерно 27 дней в течение года, причем наибольшая повторяемость отмечается в зимний сезон. Продолжительность туманов обычно составляет 3-4 часа, хотя в отдельных случаях может достигать

36 часов. Противоположная ситуация с пониженной влажностью (до 30%) наблюдается крайне редко - в среднем не более 10 дней в году, преимущественно в мае [17].

Таблица 14. Средние значения относительной влажности за 2023 год.

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднее значение относительной влажности, %	86	81	77	57	58	57	69	69	74	78	85	90

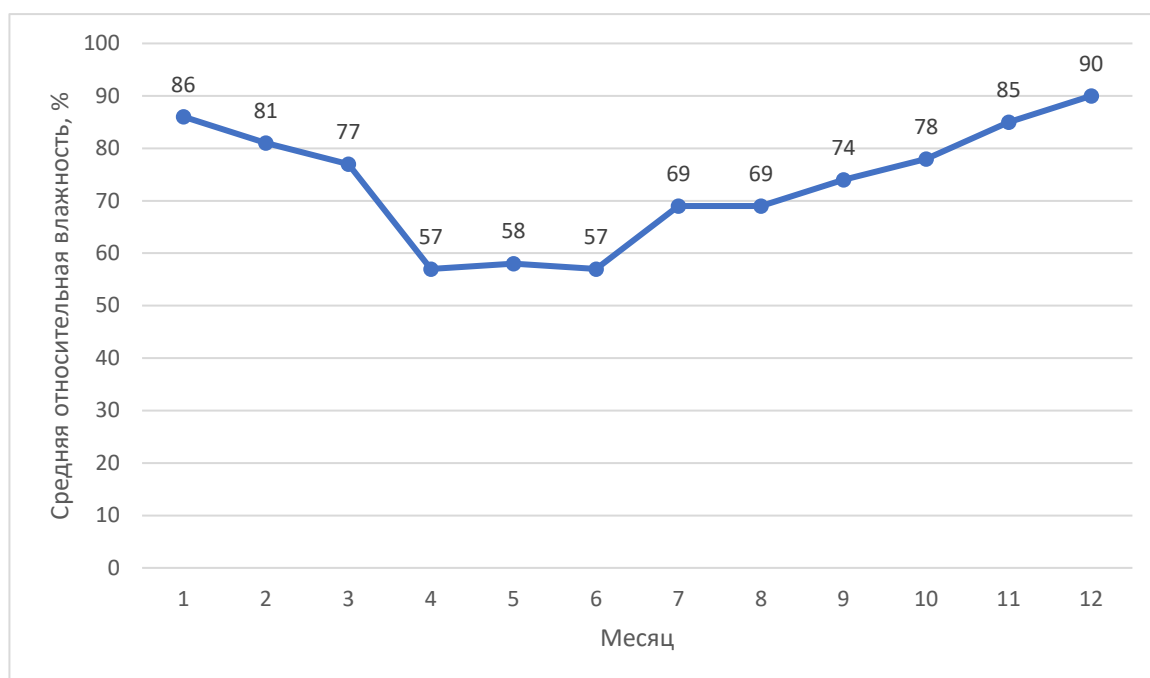


Рисунок 14. Средние значения относительной влажности за 2023 год.

Формирование влажностного режима в Санкт-Петербурге определяется комплексом факторов, среди которых ключевое значение имеют характеристики выпадающих осадков. Основными параметрами, влияющими на увлажнение территории, выступают: объем выпадающей влаги, ее агрегатное состояние (жидкое, твердое или смешанное), а также временные характеристики осадкообразования - интенсивность и продолжительность выпадения. Методика измерения осадков основана на определении толщины водного слоя (в миллиметрах), который образовался бы при условии отсутствия процессов стока,

инфильтрации и испарения. Для Санкт-Петербурга характерна выраженная пространственно-временная изменчивость осадкообразования, проявляющаяся как на межгодовом уровне, так и в рамках отдельных месяцев [22].

Эта особенность гидрологического режима оказывает существенное влияние на процессы рассеивания и трансформации загрязняющих веществ в городской атмосфере, формируя специфические условия для накопления вредных примесей в приземном слое воздуха.

Распределение осадков в течение года неравномерно: 65% выпадает в тёплый период (апрель–октябрь) с максимумом в июле–августе, а оставшиеся 35% — в холодный сезон (минимум в марте-апреле)(рисунок 15). По физическому состоянию осадки также варьируются: с декабря по февраль преобладают твёрдые осадки, с мая по октябрь — жидкие, а смешанные (мокрый снег, снег с дождём) наблюдаются во все месяцы, кроме июня, июля и августа. (рисунок 16) Для Санкт-Петербурга характерна высокая частота выпадения осадков - в среднем 194 дня в году сопровождаются дождем или снегом. Годовое количество осадков 600 мм, демонстрируя значительную межгодовую изменчивость. Важной характеристикой является общая продолжительность выпадения осадков, которая составляет от 1515 до 1550 часов ежегодно [17].

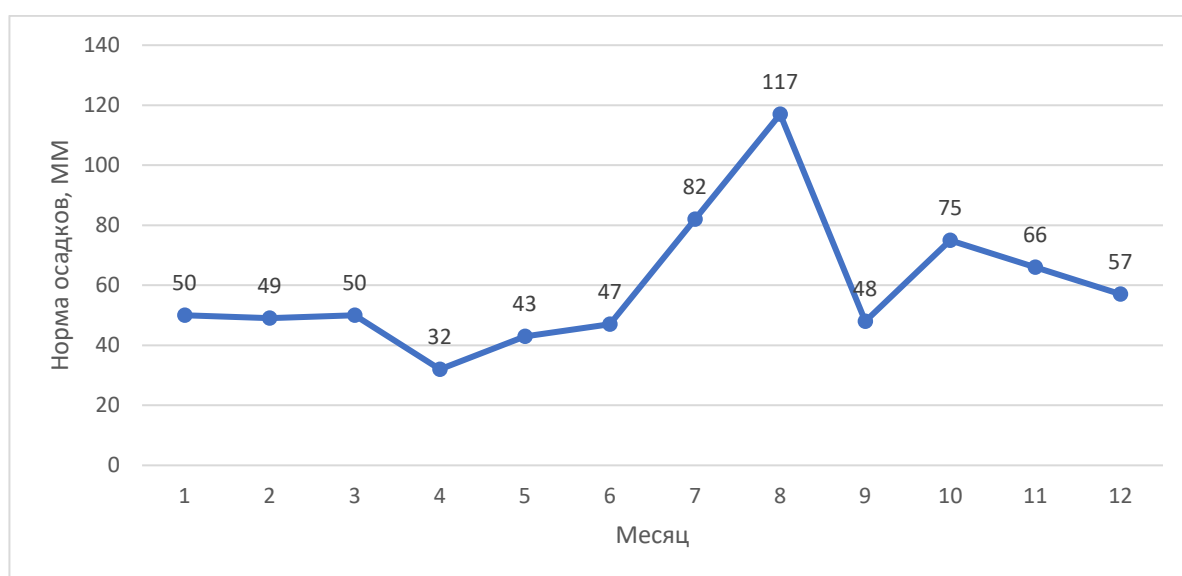


Рисунок 15. Средние значения нормы осадков за 2023 год



Рисунок 16. Число дней с твердыми, жидкими и смешанными осадками

Пространственное распределение осадков по территории города и пригородов имеет свои особенности: северные районы получают на 11% больше осадков, чем центр, а пригородная зона — более чем на 20%. В устье Невы осадков выпадает на 5–7% меньше, чем в центральных районах, а минимальные значения зафиксированы на побережье Финского залива (Лисий Нос, Петродворец, Стрельна) и островах (Кронштадт), где разница с центром достигает 8–9%. Частота выпадения осадков ($\geq 0,1$ мм) составляет 155–160 дней в год на побережье и островах и 180–200 дней — в центральных и восточных районах. За период с 1936 по 2006 гг. отмечен рост числа дней с осадками на 7,4 дня (32% от среднемноголетнего значения) [22].

Интенсивность осадков также имеет сезонные различия: в холодный период она составляет 0,2–0,4 мм/ч, а летом увеличивается до 1,1–1,3 мм/ч за счёт ливневых дождей. Эти особенности гидрометеорологического режима оказывают существенное влияние на рассеивание и накопление загрязняющих веществ в атмосфере города. Механизмы очищения атмосферы включают не только прямое вымывание загрязняющих веществ осадками, но и их поглощение облачными образованиями. Капли воды и ледяные кристаллы в облаках эффективно захватывают вредные примеси. Особенно важно отметить, что при наличии низкой облачности происходит поглощение верхних слоев городского

загрязнения, что приводит к заметному снижению концентрации вредных веществ в приземном слое атмосферы. Высокая влажность и частые осадки способствуют вымыванию аэрозолей, но в то же время при отсутствии ветра и наличии температурных инверсий (особенно зимой) создаются условия для накопления вредных примесей в приземном слое. Летние ливни, несмотря на высокую интенсивность, не всегда обеспечивают эффективное очищение воздуха, так как могут сопровождаться усиленным испарением и фотохимическими реакциями, приводящими к образованию вторичных загрязнителей. Таким образом, климатические особенности Санкт-Петербурга формируют сложную систему факторов, определяющих сезонную и пространственную изменчивость качества атмосферного воздуха в городе [22].

Таким образом, осадки и облачность выступают важными природными факторами, регулирующими уровень загрязнения воздуха в городской среде. Их учет необходим при разработке комплексных мероприятий по мониторингу и улучшению качества атмосферного воздуха мегаполиса.

2.4. Туманы

В Санкт-Петербурге туман в 2023 году регистрировался 27 дней, причем наибольшая повторяемость отмечалась в зимний сезон. Продолжительность туманов обычно составляет 3-4 часа, хотя в отдельных случаях может достигать 36 часов [17].

Туманы играют особую роль в процессах накопления загрязняющих веществ в городской атмосфере, создавая условия для их химической трансформации и повышения токсичности. В условиях повышенной влажности происходит активное поглощение атмосферных примесей водяными каплями, что способствует протеканию различных химических реакций. Особую опасность представляет процесс окисления диоксида серы до серной кислоты, значительно повышающий агрессивность воздушной среды. Наблюдения

показывают, что при образовании тумана концентрации загрязняющих веществ в приземном слое возрастают на 40-110% по сравнению с фоновыми значениями.

В отличие от облаков, где происходит вертикальный перенос загрязнений, в туманах вредные вещества остаются в непосредственной близости от земной поверхности (см.рис.17). Капли тумана, насыщенные токсичными соединениями, образуют устойчивый аэрозоль, длительное время сохраняющийся в дыхательной зоне. Это приводит к значительному увеличению риска для здоровья населения, особенно для лиц с хроническими заболеваниями дыхательной системы. В условиях Санкт-Петербурга, где туманы наблюдаются в среднем 30 дней в году, данный фактор требует особого внимания при оценке экологических рисков и разработке мер по защите атмосферного воздуха [15].



Рисунок. 17. Туман в Санкт-Петербурге, 2023 г.

Фотохимический туман (смог) представляет собой опасное метеорологическое явление, формирующееся в результате сложных химических реакций между загрязняющими веществами в атмосфере. В условиях Санкт-Петербурга образование смога происходит при взаимодействии выхлопных газов автомобильного транспорта, промышленных выбросов и природных

компонентов атмосферы. Основными участниками фотохимических реакций выступают оксиды азота, летучие органические соединения и углеводороды, которые под воздействием солнечного излучения преобразуются в высокотоксичные соединения.

Наиболее распространенным в условиях морского климата является влажный смог (лондонского типа), который представляет серьезную экологическую проблему для Санкт-Петербурга. Высокая относительная влажность воздуха (в среднем 80%) создает благоприятные условия для интенсивного взаимодействия загрязняющих веществ в сложных химических реакциях. Основным механизмом трансформации примесей при данном типе смога связан с процессами растворения диоксида серы и гигроскопических аэрозолей в атмосферной влаге. В результате последовательных химических превращений, ускоряемых солнечным излучением, происходит образование сернистой, а затем серной кислоты, что придает смогу особую токсичность. Такой тип загрязнения атмосферы, содержащий вместо обычных водяных капель кислотные растворы, представляет повышенную опасность для здоровья населения, вызывая рост респираторных заболеваний и повышение уровня смертности в периоды его возникновения [23].

Туманы выполняют функцию аккумулятора загрязняющих веществ, захватывая их как из приземного слоя, так и из вышележащих воздушных масс. Этот процесс приводит к значительному увеличению суммарной концентрации вредных веществ в дыхательной зоне. При этом в условиях тумана могут происходить химические превращения, в результате которых образуются более токсичные соединения. Наличие в тумане частиц металлов (марганца, меди, железа) или аммиака значительно ускоряет процессы окисления. Наиболее опасным является процесс превращения диоксида серы в серную кислоту, который резко повышает агрессивность воздушной среды и ее негативное воздействие на здоровье населения и городскую инфраструктуру.

Заключение

Санкт-Петербург один из самых населенных и крупных городов во всей России. Также город является очень развитым. Все эти факторы, очень сильно влияют на состояние атмосферного воздуха

В данной работе проведено комплексное исследование взаимосвязи метеорологических условий и уровня загрязнения атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге. Основное внимание было уделено анализу ключевых источников загрязнения, сезонных колебаний концентрации вредных веществ, а также влияния таких метеорологических факторов, как температура, ветер, осадки, облачность и туманы, на качество воздушной среды города.

В результате исследования можно сделать следующие выводы:

- Главным источником загрязнения воздуха в Санкт-Петербурге является автомобильный транспорт, на долю которого приходится 48% от общего объема выбросов. Промышленные предприятия (27%), строительство и коммунальное хозяйство (20%) также вносят значительный вклад. Меньший вклад вносят природные факторы (5%).
- Зимой наблюдаются наиболее высокие концентрации загрязняющих веществ (PM_{2.5}, NO₂, SO₂, CO) из-за температурных инверсий, слабых ветров и увеличения выбросов от ТЭЦ и автотранспорта.
- Метеорологические условия оказывают значительное влияние на уровень загрязнения воздуха. Низкие температуры зимой способствуют накоплению загрязняющих веществ, тогда как экстремально высокие температуры летом усиливают фотохимические реакции, приводящие к образованию вредных соединений. Направление ветра влияет на загрязнение воздуха, так как определяет, в какую сторону переносятся выбросы от источников. При скорости ветра 1-3 м/с накапливаются загрязняющие вещества в приземном слое, но парадоксальным образом снижение скорости ветра способствует вертикальному подъему

перегретых выбросов, что особенно заметно при полном отсутствии ветра, а при скорости ветра 4-7 метра возрастает вклад высоких источников выбросов в общее загрязнение воздуха. В Санкт-Петербурге средняя скорость ветра за год 2 м/с, следовательно доминирует накапливание веществ в приземном слое. Атмосферные осадки и облачный покров играют важную роль в очищении воздуха, однако в сочетании с туманами могут способствовать образованию кислотных аэрозолей. Туманы создают условия для накопления и химической трансформации загрязняющих веществ, повышая их токсичность и негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека.

Проведенное исследование подтвердило значительное влияние метеорологических условий на уровень загрязнения воздуха в Санкт-Петербурге. Полученные результаты могут быть использованы для разработки стратегий улучшения экологической ситуации в городе, а также для информирования населения и органов власти о рисках, связанных с загрязнением атмосферы.

Список использованных источников

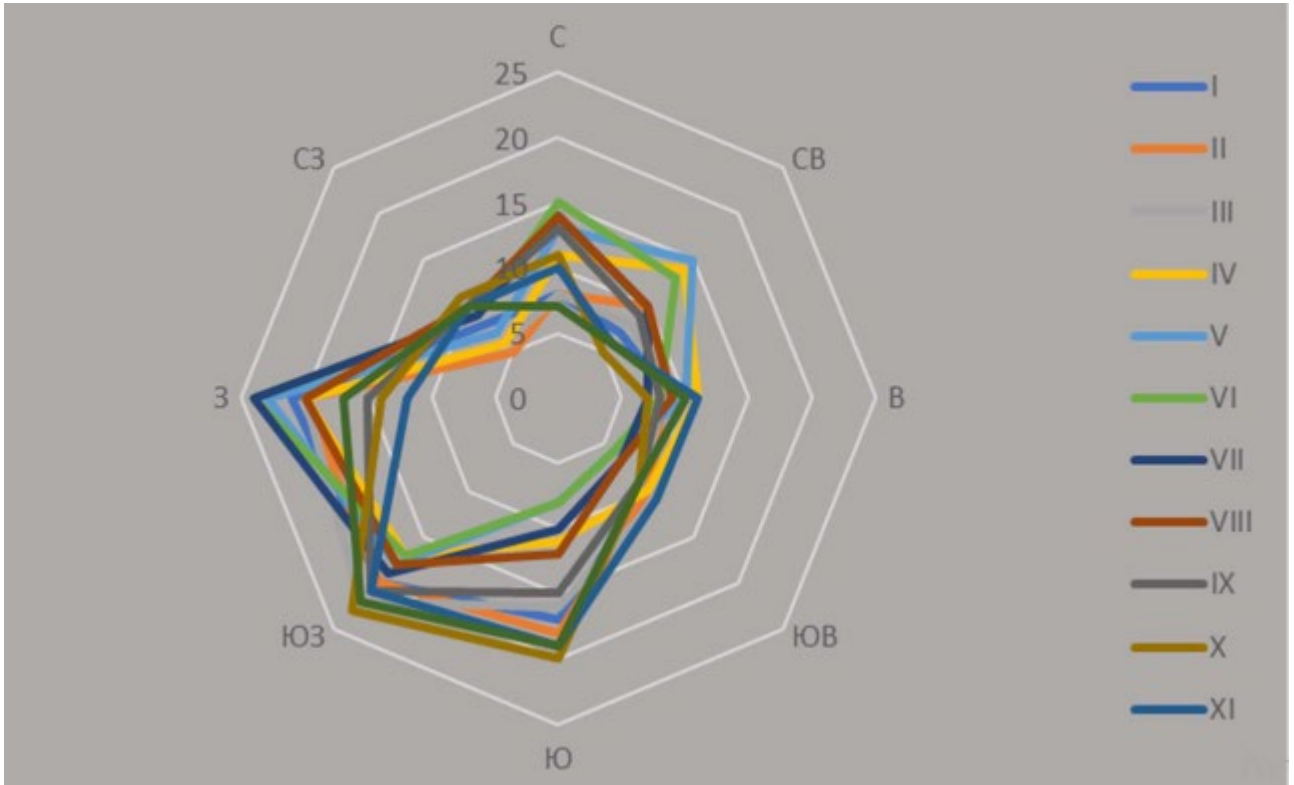
1. Учебное пособие «География Санкт-Петербурга» авторов Даринского Анатолия Викторовича и Асеевой Ирины Вениаминовны, 1996. – 78 с.
2. Официальный сайт Администрации Санкт-Петербурга [Электронный ресурс]. -Режим доступа: <https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/ecology/> (дата обращения: 17.03.2025).
3. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2023 году/ Под редакцией А.В. Германа, И.А. Серебрицкого – СПб.: 2024. - 221.с.
4. Официальный сайт ГИБДД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://гибдд.рф> (дата обращения: 17.03.2025).
5. Экологический портал Санкт-Петербурга [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ecopeterburg.ru/2020/03/19/воздействие-автомобильного-транспорта> (дата обращения 25.03.2025).
6. Энергосети России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://energoseti.ru/articles/energetika-sankt-peterburga?ysclid=mbp73fdz5o428920102> (дата обращения 25.03.2025).
7. Тихонова Л. В., Затынина Е. А., Шингаренко Т. А. Исследование величин приземных концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе объектов теплоэнергетики в зависимости от вида топлива // Вестник Курганского государственного университета. 2006 -110 – с.
8. Бактыбаева З. Б., Сулейманов Р. А., Валеев Т. К., Рахматуллин Н. Р. Оценка воздействия нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности на эколого-гигиеническое состояние объектов окружающей среды и здоровье населения (обзор литературы) // Медицина труда и экология человека. 2018. 26 – с.

9. Сергина Н. М., Соломахина Л. Я., Лазуренко К. И., Соломахин М. С. О загрязнении атмосферного воздуха Санкт-Петербурга взвешенными веществами // ИВД. 2019. – 24 с.
10. Ю. Г. Кирсанов Оценка воздействия выбросов вредных веществ на атмосферный воздух. Учебное пособие, 2018. — 110 с.
11. Доклад Комитета по строительству СПб "О воздействии строительной деятельности на окружающую среду" (2022-2023) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/stroitelstvo/> (дата обращения 27.03.2025).
12. Отчет "Оценка выбросов от строительной техники в СПб" (СПбГАСУ, 2021) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.spbgasu.ru/Research/> (дата обращения 27.03.2025).
13. Экологический портал Санкт-Петербурга [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://comitet.ecopass.adc.spb.ru/pages/sostoianie-okruzaiushhei-sredy/klimat/karakteristika-klimata> (дата обращения 27.03.2025).
14. Монография "Климат Санкт-Петербурга" под ред. Н.П. Смирнова (Гидрометеиздат, 2018)
15. Ивлев Л. С. Свойства аэрозолей и аэрозолеобразующих примесей нижней атмосферы в Ленинградской области // Биосфера. 2015.
16. Васильева Т.В. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА // Успехи современного естествознания. 2023. № 12. С. 64-70;
17. Расписание погоды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rp5.ru/> (дата обращения: 25.04.2025).
18. Алексашина В. В., Ле Минь Туан Влияние эффекта острова тепла на экологию мегаполиса // Проблемы региональной экологии. 2018.
19. Раздел "Состояние загрязнения окружающей среды"[Электронный ресурс]. – Режим доступа: meteorf.gov.ru (дата обращения: 25.04.2025)

20. Крюкова Светлана Викторовна, Симакина Татьяна Евгеньевна
Сезонная динамика влияния инверсий на уровень загрязнения атмосферы в г. Санкт-Петербурге // APRIORI. Серия: Естественные и технические науки. 2015.
21. Монография "Климат Санкт-Петербурга" (под ред. К.Ш. Хайруллина, Гидрометеиздат, 2018)
22. Климат Санкт-Петербурга и его изменения: [монография] / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Гос. учреждение "Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова" ; под ред. В. П. Мелешко, А. В. Мещерской, Е. И. Хлебниковой. - Санкт-Петербург : Гл. геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, 2010. – 254 с.
23. Фотохимические процессы земной атмосферы : Сб. науч. тр. / АН СССР, Ин-т энерг. пробл. хим. физики; Отв. ред. И. К. Ларин. - Москва : Наука, 1990. – 251 с.

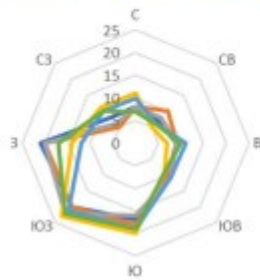
Приложение

РОЗА ВЕТРОВ (Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ) ЗА ГОД



Направление ветра в холодный период

I II III X XI XII



Направление ветра в теплый период

IV V VI VII VIII IX

