



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: «Пространственное распределение концентраций загрязняющих
веществ в Санкт-Петербурге в весенний период»

Исполнитель **Наплавкова Ксения Алексеевна**
(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)

«14» июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

Введение.....	3
1 Загрязнение атмосферы	5
1.1 Физико-химические свойства атмосферы и загрязнителей.....	5
1.2 Основные источники загрязнения воздуха и виды загрязнителей	8
1.3 Метеорологические факторы, влияющие на загрязнение воздуха	12
1.4 Критерии санитарно-гигиенической оценки качества воздуха.....	16
2. Экологический мониторинг	18
2.1 Сущность и задачи экологического мониторинга	18
2.2 Классификация и организация экологического мониторинга	20
2.3 Автоматические станции мониторинга качества атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге.....	23
3. Исследование пространственного распределения загрязняющих веществ в весенний период на территории Санкт-Петербурга	31
3.1 Анализ средних значений загрязняющих веществ.....	31
3.2 Построение полей пространственного распределения концентраций загрязняющих веществ.....	43
3.3 Выявление зависимости между распределением загрязняющих веществ и метеорологическими параметрами	48
Заключение.....	51
Список использованной литературы	53

Введение

Загрязнение атмосферного воздуха остается одной из ключевых экологических проблем современных мегаполисов, включая Санкт-Петербург. Рост числа автомобилей, промышленные выбросы и другие антропогенные факторы способствуют накоплению вредных веществ, таких как угарный газ (CO), оксиды азота (NO, NO₂), что угрожает здоровью населения и экосистемам. Весенний период представляет особый интерес для анализа, поскольку метеорологические условия, такие как изменения температуры, осадков и ветра, существенно влияют на распределение загрязнителей.

Целью работы является пространственно-временной анализ распределения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе Санкт-Петербурга в весенний период с выявлением территориальных особенностей загрязнения. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

- Рассмотреть физико-химические свойства атмосферы и основных загрязнителей (CO, NO₂).
- Выявить ключевые источники загрязнения воздуха и классифицировать виды загрязнителей.
- Проанализировать влияние метеорологических факторов на распределение загрязняющих веществ.
- Описать систему экологического мониторинга в Санкт-Петербурге, включая организацию и работу автоматических станций.
- Произвести расчёты средних значений загрязняющих веществ в весенний период.
- Построить изолинии концентраций загрязняющих веществ для анализа их пространственного распределения.
- Построение 3D-моделей для анализа пространственного распределения загрязняющих веществ.

Объектом исследования является атмосферный воздух Санкт-Петербурга, включая данные о концентрациях загрязняющих веществ, полученные с 25 автоматических станций мониторинга в весенний период 2023 года.

Предметом исследования послужило пространственно-временное распределение загрязняющих веществ в атмосфере Санкт-Петербурга и его зависимость от метеорологических факторов (температурные инверсии, ветер, осадки) в весенний период 2023 года.

Работа состоит из введения, трёх глав, разделённых на подглавы, заключения и списка использованной литературы.

Первая глава посвящена теоретическим аспектам загрязнения атмосферы, включая свойства загрязнителей, источники выбросов, метеорологические факторы и нормативы качества воздуха. Вторая глава описывает систему экологического мониторинга, включая классификацию, организацию и функционирование автоматических станций в Санкт-Петербурге. Третья глава содержит расчёт результаты расчётов и оценки содержания загрязняющих веществ в атмосфере. Заключение содержит обобщенные выводы, сформулированные на основе результатов проведённого анализа.

1 Загрязнение атмосферы

1.1 Физико-химические свойства атмосферы и загрязнителей

Атмосфера Земли представляет собой сложную газовую оболочку, окружающую планету и создающую условия для существования жизни. Она состоит преимущественно из азота (около 78%), кислорода (примерно 21%), аргона (0,93%) и углекислого газа (0,04%), а также содержит следовые количества неона, гелия, метана, водяного пара и других газов. Данные компоненты выполняют важнейшие экологические функции: кислород необходим для процессов дыхания и окисления, азот играет ключевую роль в биогеохимических циклах, диоксид углерода участвует в регуляции теплового баланса планеты благодаря парниковому эффекту, а озоновый слой обеспечивает защиту от вредного ультрафиолетового излучения. Однако хозяйственная деятельность человека, особенно в условиях крупных городских агломераций наподобие Санкт-Петербурга, приводит к поступлению в атмосферу загрязняющих веществ, что вызывает дисбаланс её природного состава [1].

Атмосфера Земли имеет слоистую структуру, каждый уровень которой обладает уникальными физико-химическими свойствами. Наиболее значимым для экосистем является тропосферный слой (0-10/12 км над поверхностью), который отличается максимальной плотностью воздушных масс и концентрацией основных метеорологических процессов – формирования осадков, циркуляции воздушных потоков и суточных температурных колебаний [2]. Именно в этом приземном слое аккумулируются основные продукты антропогенной деятельности, в частности токсичные газообразные соединения, что обусловлено непосредственной близостью к зонам промышленных и транспортных эмиссий [3]. Стратосфера, расположенная на высоте 12–50 км, содержит озоновый слой, поглощающий ультрафиолетовое излучение, что предотвращает повреждение живых организмов. Температура в стратосфере возрастает с высотой из-за нагрева озона солнечным светом.

Мезосфера (50–80 км) характеризуется низкими температурами, достигающими -90 °С, и редкими молекулами газа. Термосфера (80–700 км) нагревается до сотен градусов за счёт солнечной радиации, а экзосфера (выше 700 км) представляет собой разреженную зону, где молекулы постепенно переходят в космическое пространство. В контексте загрязнения воздуха основное внимание уделяется тропосфере, так как именно в этом слое происходят выбросы и накопление загрязнителей в Санкт-Петербурге, особенно весной, когда метеорологические условия усиливают их концентрацию.

Физические свойства атмосферы существенно влияют на поведение загрязняющих веществ. Плотность воздуха, максимальная у поверхности (около 1,2 кг/м³ на уровне моря), уменьшается с высотой, что приводит к концентрации загрязнителей в приземном слое, особенно в условиях плотной городской застройки. Атмосферное давление, составляющее в среднем 1013 гПа на уровне моря, определяет движение воздушных масс: низкое давление связано с циклонами, способствующими рассеянию загрязнителей, тогда как высокое давление, характерное для антициклонов, удерживает их вблизи поверхности [1]. Температура воздуха в тропосфере снижается с высотой примерно на 6,5 °С на километр, но в условиях мегаполисов, таких как Санкт-Петербург, весенние температурные инверсии могут препятствовать вертикальному перемешиванию, усиливая загрязнение. Турбулентность, вызванная ветрами и конвективными потоками, способствует перемешиванию воздуха, но в городских условиях она ограничена зданиями, что приводит к локальному накоплению вредных веществ. Водяной пар, присутствующий в тропосфере в концентрациях от 0 до 4%, влияет на влажность и осаждение загрязнителей, а радиационные свойства атмосферы, связанные с поглощением солнечного света, определяют фотохимические реакции.

Химические свойства атмосферы обусловлены реакционной способностью её компонентов. Атмосферные газы играют ключевую роль в трансформации загрязняющих веществ. Кислород катализирует окислительные

реакции, в частности конверсию оксида азота в диоксид, интенсивность которой возрастает при повышении температуры. Углекислый газ, обладая высокой парниковой активностью, способствует локальному потеплению в урбанизированных районах [3]. Тропосферный озон, формирующийся в результате фотохимических реакций оксидов азота под действием солнечной радиации, представляет опасность для дыхательной системы. Водяной пар вступает в реакции с атмосферными загрязнителями, приводя к образованию кислотных осадков. Совокупность этих процессов определяет поведение и экологические последствия загрязняющих веществ в атмосфере.

Среди наиболее значимых объектов экологического мониторинга в урбанизированной среде выделяются угарный газ, оксид и диоксид азота, что обусловлено их высокой токсичностью и повсеместным распределением. Угарный газ — бесцветное вещество без запаха, образующееся при неполном сгорании топлива, например, в автомобильных двигателях или котельных. Он обладает высокой токсичностью, связываясь с гемоглобином крови и препятствуя транспорту кислорода, что особенно опасно в плотно заселённых районах Санкт-Петербурга. Оксид азота и диоксид азота формируются при высокотемпературных процессах, таких как сгорание бензина или природного газа. Диоксид азота, отличающийся красно-бурым цветом и резким запахом, раздражает дыхательные пути, способствует образованию фотохимического смога и кислотных дождей. Физико-химические свойства этих веществ определяют их поведение в атмосфере: угарный газ, плохо растворимый в воде, может сохраняться в воздухе до нескольких месяцев, тогда как диоксид азота активно реагирует с влагой, образуя кислотные соединения, которые выпадают с осадками. Оксид азота быстро окисляется до диоксида азота под действием солнечного света и кислорода, что ускоряется в ясные весенние дни [1].

Взаимодействие загрязнителей с атмосферой зависит от её физических и химических характеристик. Например, высокая влажность в Санкт-Петербурге весной усиливает осаждение диоксида азота, тогда как угарный газ остаётся в

воздухе даже во время дождей. Температурные инверсии, характерные для весеннего периода, удерживают загрязнители в приземном слое, особенно в утренние часы, когда транспортная активность высока. Турбулентность в тропосфере может рассеивать загрязняющие вещества, но в условиях плотной застройки её эффект ограничен, что приводит к накоплению угарного газа и оксидов азота в центральных районах города. Солнечная радиация, усиливающая фотохимические реакции, повышает концентрацию вторичных загрязнителей, таких как озон, что требует особого внимания при мониторинге качества воздуха [4].

1.2 Основные источники загрязнения воздуха и виды загрязнителей

Загрязнение атмосферного воздуха — это изменение его естественного состава за счёт поступления вредных веществ. Эти вещества, выделяемые природными или антропогенными источниками, ухудшают качество воздуха, угрожая здоровью человека и экосистемам.

Загрязнение воздуха приводит к респираторным заболеваниям, изменению климата и деградации окружающей среды [3]. В Санкт-Петербурге весной 2023 года эта проблема особенно актуальна из-за высокой транспортной нагрузки и сезонных метеоусловий.

Типы загрязнений:

Загрязнение воздуха классифицируется по природе воздействия.

- Химическое загрязнение связано с выбросами газов и частиц, таких как угарный газ или диоксид азота. Оно преобладает в городах.
- Физическое загрязнение включает шум, тепло или радиацию, влияющие на микроклимат. Например, тепло от промышленных объектов в Санкт-Петербурге может усиливать температурные инверсии.

- Биологическое загрязнение вызвано микроорганизмами или пылью, хотя в мегаполисах оно менее распространено. Химическое загрязнение остаётся приоритетом для мониторинга.

Источники загрязнения делятся на природные и антропогенные. Природные включают вулканы, лесные пожары и пыльные бури [3]. В Санкт-Петербурге природные источники, такие как пыльца или морские аэрозоли, играют второстепенную роль.

Антропогенные источники доминируют в мегаполисах. Автотранспорт — главный источник выбросов угарного газа и оксидов азота. В центральных районах, таких как Адмиралтейский, транспорт создаёт до 70% загрязнения.

Промышленные предприятия, включая судостроительные заводы в Кировском районе, выбрасывают диоксид серы и твёрдые частицы. Энергетические установки, работающие на ископаемом топливе, также вносят вклад.

Отопительные системы в жилых районах, особенно весной 2023 года, усиливали выбросы угарного газа и сажи. Сельское хозяйство, хотя и менее значимо в городе, добавляет аммиак из пригородных зон [4].

В таблице 1 представлены главные источники загрязнения атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге.

Таблица 1. Основные источники загрязнения воздуха в Санкт-Петербурге

Источник	Загрязнители	Пример в Санкт-Петербурге
Автотранспорт	CO, NO, NO ₂ , PM ₁₀	Невский проспект, пробки
Промышленность	SO ₂ , PM _{2.5} , NO ₂	Заводы в Кировском районе
Энергетика/отопление	CO, PM, SO ₂	Котельные в Приморском районе
Природные	Пыльца, аэрозоли	Прибрежные зоны Финского залива

Виды загрязняющих веществ:

Загрязняющие вещества включают газы, твёрдые частицы и органические соединения. Угарный газ образуется при неполном сгорании топлива. Он токсичен, вызывая головные боли и удушье [4].

Оксиды азота, такие как оксид и диоксид азота, формируются при высокотемпературном сгорании. Диоксид азота раздражает лёгкие и вызывает кислотные дожди.

Диоксид серы, выделяемый промышленностью, способствует респираторным заболеваниям. В Санкт-Петербурге его концентрация ниже, чем в угольных регионах, но всё же заметна.

Твёрдые частицы (PM₁₀, PM_{2.5}) включают пыль, сажу и золу. Они проникают в лёгкие, вызывая хронические заболевания. В городе их источником служат дороги и стройки [5].

Летучие органические соединения, такие как бензол, выделяются при сгорании топлива и испарении растворителей. Они участвуют в образовании смога.

В таблице 2 представлены источники и воздействие основных загрязняющих веществ.

Таблица 2. Характеристики основных загрязнителей

Вещество	Источник	Воздействие
CO	Транспорт, котельные	Нарушение транспорта кислорода
NO, NO ₂	Автомобили, заводы	Респираторные проблемы, смог
SO ₂	Промышленность	Кислотные дожди, раздражение лёгких
PM10, PM2.5	Дороги, стройки	Хронические заболевания лёгких
ЛОС (бензол)	Транспорт, растворители	Смог, канцерогенное воздействие

Особенности загрязнения в Санкт-Петербурге:

В Санкт-Петербурге транспорт доминирует в структуре выбросов. Весной 2023 года пробки на магистралях, таких как Московский проспект, усиливали концентрации угарного газа и диоксида азота.

Промышленные зоны, такие как Красногвардейский район, добавляют твёрдые частицы и диоксид серы. Строительные работы в новых жилых комплексах увеличивают выбросы пыли [5].

Сезонные факторы, включая работу котельных в марте-апреле, повышают выбросы сажи. Влажность и инверсии весной удерживают загрязнители в приземном слое [6, 7].

Рост числа электромобилей в 2023 году мог снизить выбросы угарного газа. Однако износ шин и дорожного покрытия продолжает генерировать твёрдые частицы.

Внедрение экологичных технологий, таких как фильтры на заводах, уменьшает выбросы диоксида серы [7]. Эти изменения требуют дальнейшего мониторинга для оценки их эффективности.

1.3 Метеорологические факторы, влияющие на загрязнение воздуха

Метеорологические факторы существенно влияют на распределение, накопление и рассеяние загрязняющих веществ в атмосфере. Такие параметры, как ветер, температура, осадки, влажность и атмосферное давление, определяют, как угарный газ, оксиды азота и твёрдые частицы распространяются в приземном слое. Весной 2023 года в Санкт-Петербурге наблюдалась нестабильная метеорологическая обстановка, характеризующаяся частыми температурными инверсиями и чередованием циклонов с антициклонами, что существенно осложняло контроль качества атмосферного воздуха. Данные метеорологические условия требуют особого внимания при проектировании системы экологического мониторинга, поскольку они обладают двойственным эффектом: способствуют как рассеиванию загрязняющих веществ, так и их накоплению в отдельных районах, особенно в центральной части города с интенсивным транспортным потоком.

Ветер выступает важнейшим фактором, определяющим пространственное распределение загрязняющих веществ в городской атмосфере [3]. В Санкт-Петербурге, где ветровой режим существенно зависит от влияния Финского залива, интенсивные воздушные потоки обеспечивают эффективное

перемешивание атмосферных слоёв. Это приводит к значительному снижению концентраций таких опасных загрязнителей, как гарный газ и диоксид азота, вблизи основных источников эмиссии, включая транспортные магистрали Московского проспекта. В противоположность этому, при установлении антициклональных условий, сопровождающихся ослаблением ветра, наблюдается аккумуляция вредных веществ в приземном слое атмосферы, что особенно выражено в районах с высокой плотностью застройки, подобных Невскому проспекту. Направление ветра также имеет значение: западные ветра приносят чистый морской воздух, тогда как восточные могут переносить промышленные выбросы из Красногвардейского района в центр города. Весной 2023 года переменные ветровые режимы усложняли прогнозирование загрязнения, требуя оперативного мониторинга.

Температура воздуха влияет на химические реакции и физическое поведение загрязнителей. Высокие температуры, иногда наблюдаемые в апреле, ускоряют окисление оксида азота в диоксид азота, повышая его концентрацию и способствуя образованию фотохимического смога [3]. Температурные инверсии, частые в утренние часы весной, создают слой тёплого воздуха, который удерживает загрязнители у поверхности, усиливая смог в Адмиралтейском районе. Низкие температуры, напротив, замедляют рассеяние твёрдых частиц, что заметно в жилых зонах с активными котельными в марте 2023 года. Эти эффекты подчёркивают важность учёта температуры при анализе качества воздуха.

Осадки, такие как дождь и снег, выступают естественным механизмом очистки атмосферы. Диоксид азота, обладая высокой растворимостью, взаимодействует с водой, образуя кислотные осадки, что снижает его концентрацию в воздухе [6]. Твёрдые частицы, такие как PM₁₀, также вымываются осадками, что особенно заметно в прибрежных районах Приморского района. Однако угарный газ, из-за низкой растворимости, остаётся в атмосфере даже во время дождей, затрудняя очистку воздуха в

центре Санкт-Петербурга. Весной 2023 года частые осадки помогали снижать уровень пыли, но их эффективность снижалась в штилевые дни, когда загрязнители накапливались [8].

Влажность воздуха влияет на осаждение и химические свойства загрязнителей. Высокая влажность, характерная для Санкт-Петербурга из-за близости Финского залива, способствует образованию аэрозолей, которые осаждают твёрдые частицы, такие как PM_{2.5}, в прибрежных зонах. Она также усиливает реакции диоксида азота с водой, формируя кислотные соединения, что заметно весной, в районах с высокой транспортной нагрузкой [11]. Низкая влажность, иногда наблюдаемая в марте 2023 года, наоборот, увеличивает концентрацию пыли, особенно в строительных зонах Красногвардейского района. Эти процессы требуют учёта при прогнозировании качества воздуха.

Атмосферное давление определяет тип погодных условий, влияющих на загрязнение. Низкое давление, связанное с циклонами, сопровождается ветрами и осадками, что способствует рассеянию угарного газа и оксидов азота, улучшая качество воздуха в промышленных зонах, таких как Кировский район. Высокое давление, характерное для антициклонов, создаёт штилевые условия, приводящие к накоплению загрязнителей в приземном слое, особенно в центре города. Весной 2023 года чередование циклонов и антициклонов создавало нестабильные условия, что влияло на концентрацию загрязнителей в разных районах Санкт-Петербурга.

Взаимодействие метеофакторов и загрязнителей:

Метеорологические факторы действуют в совокупности, усиливая или ослабляя загрязнение. Например, сочетание штиля и температурной инверсии резко повышает концентрацию диоксида азота в центральных районах, таких как Невский проспект. Осадки и высокая влажность эффективно снижают уровень твёрдых частиц, но почти не влияют на угарный газ, требуя иных мер контроля [10]. Весной 2023 года слабые ветра и утренние инверсии часто

усиливали загрязнение в Адмиралтейском районе, тогда как западные ветра с Финского залива временно очищали воздух. Эти взаимодействия подчёркивают сложность управления качеством воздуха в мегаполисе.

В таблице 3 представлено, как определённые метеорологические факторы влияют на различные загрязнители.

Таблица 3. Влияние метеорологических факторов на загрязнители

Фактор	СО	NO/NO ₂	PM10/PM2.5
Сильный ветер	Рассеяние	Рассеяние	Рассеяние
Штиль	Накопление	Накопление	Накопление
Высокая температура	Ускорение реакций	Окисление NO в NO ₂	Замедление осаждения
Инверсия	Накопление	Накопление	Накопление
Осадки	Слабое влияние	Вымывание	Вымывание
Высокая влажность	Слабое влияние	Образование кислот	Осаждение
Высокое давление	Накопление	Накопление	Накопление

Весенний период в Санкт-Петербурге характеризуется нестабильной погодой, влияющей на загрязнение воздуха [13]. Частые циклоны приносили осадки и ветра, снижая концентрацию твёрдых частиц в промышленных зонах, таких как Красногвардейский район. Антициклоны, наоборот, создавали штилевые условия, усиливая накопление оксидов азота в центре города. Близость Финского залива повышала влажность, способствуя осаждению диоксида азота, но утренние температурные инверсии ухудшали ситуацию в плотно застроенных районах, таких как Адмиралтейский. Эти особенности подчёркивают необходимость интеграции метеоданных в системы мониторинга для точного прогнозирования пиков загрязнения [9].

1.4 Критерии санитарно-гигиенической оценки качества воздуха

Санитарно-гигиеническая оценка качества атмосферного воздуха основывается на сравнении фактических концентраций загрязняющих веществ с установленными нормативами, которые обеспечивают безопасность для здоровья человека и окружающей среды. Основным инструментом такой оценки в России являются предельно допустимые концентрации (ПДК), регламентированные нормативными документами, такими как Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.1338-03 [9]. Эти нормативы устанавливают максимально допустимые уровни загрязнителей для различных временных интервалов — максимальная разовая (ПДК_{мр}) и среднесуточная (ПДК_{сс}) концентрации [10].

Для ключевых загрязнителей, таких как угарный газ (CO), оксид азота (NO) и диоксид азота (NO₂), ПДК определены следующим образом:

- Угарный газ (CO): ПДК_{мр} составляет 5 мг/м³, ПДК_{сс} — 3 мг/м³. CO относится к 4-му классу опасности (низкая токсичность), но его превышение может вызывать головные боли и снижение когнитивных функций.
- Оксид азота (NO): ПДК_{мр} — 0,4 мг/м³, ПДК_{сс} — 0,06 мг/м³. NO классифицируется как вещество 3-го класса опасности, менее токсичное, чем NO₂, но способствующее образованию вторичных загрязнителей.
- Диоксид азота (NO₂): ПДК_{мр} — 0,2 мг/м³, ПДК_{сс} — 0,04 мг/м³. NO₂ также относится к 3-му классу опасности и представляет угрозу для дыхательной системы, особенно при длительном воздействии.

В таблице 4 представлены основные загрязняющие вещества и их предельно допустимые концентрации.

Таблица 4. ПДК для основных загрязнителей

Загрязнитель	<u>ПДК_{мр}</u> (мг/м³)	<u>ПДК_{сс}</u> (мг/м³)	Класс опасности
CO	5	3	4
NO	0,4	0,06	3
NO ₂	0,2	0,04	3

Помимо ПДК, для комплексной оценки качества воздуха используется индекс загрязнения атмосферы (ИЗА), который учитывает концентрации нескольких загрязнителей относительно их ПДК. ИЗА рассчитывается как сумма отношений фактических концентраций к ПДК для каждого вещества, что позволяет оценить общий уровень загрязнения в конкретном районе [15]. Например, в Санкт-Петербурге высокие значения ИЗА могут наблюдаться вблизи крупных транспортных магистралей, таких как Невский проспект, где концентрации CO и NO₂ часто приближаются к предельным значениям.

Санитарно-гигиенические нормативы также учитывают кратность превышения ПДК и продолжительность воздействия. Кратковременное превышение ПДК_{мр} допустимо в исключительных случаях, но систематическое превышение ПДК_{сс} указывает на хроническое загрязнение, требующее мер по снижению выбросов [13]. В условиях Санкт-Петербурга весной 2023 года, вероятно, особое внимание уделялось контролю NO₂, так как этот загрязнитель связан с интенсивным движением транспорта и может усиливать своё воздействие при температурных инверсиях, характерных для весеннего периода.

Дополнительно применяются международные стандарты, такие как рекомендации Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), которые часто устанавливают более строгие лимиты. Например, для NO_2 ВОЗ рекомендует среднегодовую концентрацию не выше $0,01 \text{ мг/м}^3$, что значительно ниже российских ПДКсс. Это подчёркивает необходимость гармонизации российских нормативов с международными для повышения экологической безопасности.

Таким образом, санитарно-гигиеническая оценка качества воздуха в Санкт-Петербурге основывается на строгих нормативах ПДК и комплексных индексах, что позволяет выявлять зоны риска и разрабатывать меры по улучшению экологической ситуации [11].

2. Экологический мониторинг

2.1 Сущность и задачи экологического мониторинга

Экологический мониторинг представляет собой систему регулярных наблюдений за состоянием окружающей среды, направленных на оценку её качества, выявление изменений под воздействием природных и антропогенных факторов, а также прогнозирование возможных экологических рисков. В контексте атмосферного воздуха мониторинг фокусируется на измерении концентраций загрязняющих веществ, таких как угарный газ (CO), оксиды азота (NO , NO_2), и анализе факторов, влияющих на их распределение [12].

Экологический мониторинг представляет собой комплексную систему наблюдения, анализа и оценки состояния окружающей среды, направленную на обеспечение экологической безопасности и устойчивого развития. Его сущность заключается в систематическом сборе, обработке и интерпретации данных о различных компонентах природной среды. Это система выполняет важнейшие функции контроля текущего состояния экосистем, диагностики возникающих проблем и прогнозирования возможных изменений. Особое

значение экологический мониторинг приобретает в условиях крупных городов, где требуется постоянное отслеживание уровня загрязнения атмосферного воздуха и оперативное реагирование на превышение установленных нормативов. В Санкт-Петербурге, с его сложными метеорологическими условиями и высокой антропогенной нагрузкой, система мониторинга позволяет своевременно выявлять изменения качества воздуха, особенно в периоды сезонных переходов, когда погодные факторы существенно влияют на распределение загрязняющих веществ.

Основные задачи экологического мониторинга:

- Сбор данных: Мониторинг концентраций загрязняющих веществ посредством автоматизированных станций, обеспечивающих постоянный контроль параметров атмосферного воздуха [12].
- Анализ и оценка: Сравнение полученных данных с санитарно-гигиеническими нормативами, такими как Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.1338-03, для определения уровня загрязнения.
- Прогнозирование: Моделирование распространения загрязнителей с учётом метеорологических факторов, таких как ветер и температурные инверсии.
- Информирование: Предоставление данных государственным органам, научному сообществу и общественности для принятия обоснованных решений.
- Разработка рекомендаций: Формирование предложений по снижению выбросов, например, оптимизация транспортных потоков или внедрение экологических технологий [15].

В Санкт-Петербурге в 2023 году экологический мониторинг, вероятно, был усилен за счёт внедрения современных технологий, таких как автоматизированные системы обработки данных, что позволило повысить точность и оперативность контроля качества воздуха. Особое внимание

уделяется мониторингу зон с высокой транспортной и промышленной нагрузкой, где концентрации CO и NO₂ могут приближаться к предельным значениям. Экологический мониторинг также способствует выполнению международных обязательств России в области охраны окружающей среды, включая соблюдение стандартов качества воздуха.

Таким образом, экологический мониторинг является неотъемлемой частью управления экологической ситуацией в мегаполисах, обеспечивая базу для принятия мер по снижению загрязнения и защите здоровья населения [13].

2.2 Классификация и организация экологического мониторинга

Экологический мониторинг представляет собой систему наблюдений за состоянием окружающей среды, направленную на контроль качества воздуха, воды и других компонентов. Классификация мониторинга позволяет структурировать подходы к сбору данных, адаптируя их к условиям мегаполисов, таких как Санкт-Петербург. Различия в объектах, методах, масштабах, уровнях организации и периодичности наблюдений обеспечивают точное отслеживание загрязнителей, таких как угарный газ и диоксид азота. В 2023 году классификация в городе учитывала транспортную нагрузку и метеорологические особенности, что повышало эффективность экологического контроля [14].

Классификация систем мониторинга:

Системы экологического мониторинга классифицируются по нескольким ключевым критериям, каждый из которых определяет специфику наблюдений. Эти критерии позволяют адаптировать мониторинг к задачам, связанным с контролем загрязнения в Санкт-Петербурге. Ниже представлены основные категории классификации с примерами их применения в городских условиях.

- По объекту наблюдения:

Мониторинг может охватывать атмосферу, гидросферу, литосферу или биосферу. В Санкт-Петербурге приоритет отдаётся атмосферному мониторингу, измеряющему концентрации угарного газа и оксидов азота в районах с высокой транспортной нагрузкой, таких как Невский проспект. Например, в промышленных зонах, таких как Кировский район, отслеживаются выбросы твёрдых частиц. Мониторинг водных объектов, таких как река Нева, оценивает осаждение кислотных соединений, дополняя данные об атмосфере. Этот подход позволяет сосредоточиться на наиболее уязвимых компонентах окружающей среды.

- По методам проведения:

Мониторинг делится на химический, физический и биологический. Химический мониторинг, наиболее распространённый в Санкт-Петербурге, использует газоанализаторы для анализа угарного газа и диоксида азота в реальном времени, что критично для центральных районов. Физический мониторинг измеряет шум или радиацию в промышленных зонах, таких как Красногвардейский район. Биологический мониторинг применяет биоиндикаторы, например лишайники в парке Сосновка, для оценки долгосрочного загрязнения. Химические методы в 2023 году доминировали из-за их точности [13].

- По масштабу:

Мониторинг бывает локальным, региональным и глобальным. Локальный мониторинг в Санкт-Петербурге сосредоточен на конкретных зонах, таких как Московский проспект, где высока концентрация транспортных выбросов. Региональный мониторинг охватывает Ленинградскую область, учитывая перенос загрязнителей из пригородов. Глобальный мониторинг, менее актуальный для города, отслеживает изменения климата или озонового слоя. В

2023 году локальный мониторинг был приоритетным, обеспечивая быструю реакцию на превышения нормативов [15].

- По уровню организации:

Различают государственный, ведомственный и общественный мониторинг. Государственный мониторинг в Санкт-Петербурге проводится Комитетом по природопользованию, контролируя качество воздуха в жилых и промышленных зонах. Ведомственный мониторинг проводят промышленные предприятия (например, в Приморском районе) для контроля выбросов. В 2023 году активно развивался общественный мониторинг с использованием портативных датчиков в парковых зонах типа Юсуповского дворца, формируя многоуровневую систему наблюдений.

- По периодичности:

Система мониторинга подразделяется на три типа: непрерывный, периодический и эпизодический. В Санкт-Петербурге непрерывные наблюдения на стационарных постах позволяют отслеживать уровень диоксида азота в районах с интенсивным трафиком, включая Адмиралтейский район. Периодические измерения, проводимые ежемесячно, фиксируют сезонную динамику загрязнения, что особенно важно в переходные периоды, подобные весне 2023 года. Эпизодический контроль осуществляется при чрезвычайных ситуациях, например, при аварийных выбросах на строительных объектах. В 2023 году приоритет отдавался непрерывному мониторингу как наиболее оперативному методу контроля [15].

Экологический мониторинг в Санкт-Петербурге регламентирован нормативно-правовыми актами различных уровней. Наблюдательная сеть включает стационарные станции в промышленных (Красногвардейский район) и жилых (Васильевский район) районах, оборудование приборами для измерения СО, оксидов азота и РМ. В 2023 году цифровизация системы с внедрением

алгоритмов машинного обучения повысила эффективность прогнозирования. Мобильные лаборатории обеспечивают мониторинг временных источников загрязнения [16].

В 2023 году система экологического мониторинга Санкт-Петербурга была усилена за счёт внедрения новых технологий и создания единой платформы для агрегации и анализа данных. Программное обеспечение для обработки данных в реальном времени позволяло быстро выявлять превышения концентраций диоксида азота, особенно весной, когда метеоусловия способствовали накоплению загрязнителей. Основное внимание уделялось зонам с интенсивным движением, таким как Невский проспект, и промышленным районам, где отслеживались твёрдые частицы. Развитие общественного мониторинга, включая данные от гражданских датчиков, повысило прозрачность системы. Эти меры способствовали соответствию города международным экологическим стандартам и устойчивому развитию [17].

2.3 Автоматические станции мониторинга качества атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге

Автоматические станции мониторинга качества атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге составляют ядро системы экологического контроля, обеспечивая непрерывное наблюдение за состоянием воздуха в мегаполисе. Эти станции стратегически размещены в промышленных, жилых и центральных районах, чтобы фиксировать концентрации ключевых загрязнителей, таких как угарный газ (CO), оксиды азота (NO, NO₂), твёрдые частицы (PM_{2.5}, PM₁₀), а также метеорологические параметры, влияющие на их распространение. В 2023 году сеть включала 25 автоматических станций, управляемых Комитетом по природопользованию и Северо-Западным управлением по гидрометеорологии. Данные, собираемые в реальном времени, публикуются на Экологическом портале города, предоставляя жителям доступ к информации о качестве воздуха. Эта сеть позволяет оперативно выявлять зоны повышенного

загрязнения, такие как районы с интенсивным движением, и разрабатывать меры по улучшению экологической обстановки [18].

Автоматические станции мониторинга классифицируются по нескольким критериям, что позволяет адаптировать их к разнообразным условиям Санкт-Петербурга и задачам контроля качества воздуха. Классификация включает следующие категории, обеспечивающие эффективное распределение ресурсов и точность данных [19]:

По типу станции:

- Стационарные автоматические станции работают непрерывно на фиксированных местах, оснащены высокоточным оборудованием для анализа CO, NO₂, PM в реальном времени. Они критически важны для зон с высокой нагрузкой, таких как центральные районы.
- Мобильные автоматические станции представляют собой передвижные лаборатории, используемые для краткосрочных замеров вблизи временных источников, таких как строительные площадки в развивающихся районах [18].

По расположению:

- Городские станции размещены в плотно застроенных районах с высокой антропогенной активностью, таких как Центральный или Адмиралтейский, для контроля транспортных выбросов.
- Фоновые станции расположены в менее загрязнённых зонах, например, в Курортном районе, для оценки базового уровня загрязнения и трансграничного переноса.

По функциям:

- Многоцелевые станции автоматически измеряют широкий спектр загрязнителей (CO, NO₂, PM) и метеопараметров, таких как температура, влажность и давление, для комплексного анализа.
- Специализированные станции фокусируются на конкретных загрязнителях, например, PM₁₀ в промышленных зонах, таких как Кировский район, с автоматической регистрацией данных [17].

Эта классификация обеспечивает гибкость мониторинга, позволяя учитывать транспортные, промышленные и климатические особенности города, включая влияние Финского залива на влажность [18].

Размещение станций по районам:

Автоматические станции мониторинга стратегически распределены по районам Санкт-Петербурга для охвата зон с различными источниками загрязнения. В Центральном районе станции отслеживают транспортные выбросы CO и NO₂ вблизи оживлённых магистралей, обеспечивая непрерывный контроль. В Адмиралтейском районе многоцелевые станции фиксируют PM_{2.5} и метеопараметры, учитывая плотную застройку и пробки. Кировский район, с его промышленными предприятиями, оснащён станциями, специализирующимися на PM₁₀ и NO, для анализа заводских выбросов. В Приморском районе, у Финского залива, станции контролируют CO и PM_{2.5}, коррелируя данные с высокой влажностью. Красногвардейский район фокусируется на NO и твёрдых частицах, учитывая промышленную активность. Фоновые станции в Курортном районе измеряют базовый уровень PM_{2.5} и озона, а мобильные станции работают в зонах строительства, таких как новые жилые комплексы в Приморском районе.

Схема размещения автоматических станций представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Схема размещения автоматических станций

Адреса расположения автоматических станций:

- №1 ул. Профессора Попова, дом 48;
- №2 г. Колпино, Красная ул., дом 1А;
- №3 ул. Карбышева, дом 7;
- №4 ул. Жака Дюкло, д. 66;
- №5 Елагин остров, дом 4;
- №6 пр. КИМа, дом 26 лит. А;
- №7 Шпалерная ул., дом 56;
- №8 ул. Новосельковская, дом 23;
- №9 Малая Балканская ул., дом 54;

- №10 Московский пр., дом 19;
- №11 г. Сестрорецк, ул. М.Горького, дом 2;
- №12 ул. Пестеля, дом 1;
- №13 шоссе Революции, дом 84;
- №14 Уткин пр., д. 16;
- №15 г. Кронштадт, ул. Ильмянинова, дом 4;
- №16 ул. Севастьянова, дом 11;
- №17 г. Пушкин, Тиньков пер., дом 4;
- №18 ул. Ольги Форш, дом 6;
- №19 пр.Ветеранов, дом 167, к. 6/1;
- №20 ул. Тельмана, дом 24;
- №21 г. Ломоносов, ул. Федюнинского, дом 3;
- №22 Канонерский остров, дом 21, строение 1;
- №23 пр. Динамо, дом 44;
- №24 В.О. Средний пр., дом 74;
- №25 пос. Металлострой, Железнодорожная ул., дом 13;

Оборудование станций:

Автоматические станции оснащены высокотехнологичным оборудованием для непрерывного анализа загрязнителей и метеопараметров, обеспечивая точность и оперативность данных [19]. Основные категории приборов включают газоанализаторы, пылемеры, метеорологические датчики и системы обработки данных, все с автоматическим управлением. Их функции и примеры:

Газоанализаторы:

- Автоматически измеряют концентрации CO, NO, NO₂, озона (O₃) и сернистого газа (SO₂) с высокой точностью.

- Пример: Thermo Scientific Model 48i использует инфракрасную спектроскопию для анализа CO, установлен на станциях в центральных районах для непрерывного мониторинга.
- Horiba APNA-370, основанный на хемилюминесценции, автоматически отслеживает NO/NO₂ в промышленных зонах, таких как Кировский район.

Пылемеры:

- Автоматически анализируют PM2.5 и PM10 с использованием оптических или гравиметрических методов.
- Пример: TSI DustTrak DRX – автоматический пылемер, применяемый на мобильных станциях вблизи строительных зон для анализа PM10 в реальном времени.
- Met One BAM-1022 – референтный пылемер для стационарных станций, обеспечивает автоматические данные о PM2.5 в жилых районах, таких как Адмиралтейский.

Метеорологические датчики:

- Автоматически фиксируют температуру, влажность, скорость ветра и давление для корреляции с уровнями загрязнения [19].
- Пример: Vaisala WXT536 – многофункциональный метеодатчик, установленный на большинстве станций, включая прибрежные районы, для анализа влияния влажности на PM.

Системы сбора и передачи данных:

- Обеспечивают автоматический сбор, обработку и передачу данных в реальном времени на серверы [20].

- Пример: EnviMap – программное обеспечение, модернизированное в 2023 году для интеграции данных с постов в промышленных и центральных зонах, поддерживающее автоматический анализ.

Все приборы калибруются по международным стандартам, таким как NIST, для обеспечения достоверности. В 2023 году станции начали интегрировать низкозатратные автоматические датчики, такие как PurpleAir, для расширения сети, особенно в общественном мониторинге в парковых зонах, таких как Сосновка.

Особенности работы автоматических станций:

Автоматические станции адаптированы к городской среде и климатическим условиям Санкт-Петербурга, обеспечивая непрерывный мониторинг в реальном времени. Их размещение учитывает транспортные потоки, плотность застройки и влияние Финского залива, повышающего влажность [20]. Стационарные станции, работающие в Центральном и Адмиралтейском районах, автоматически собирают данные каждые 10–60 минут, выявляя пики NO_2 , связанные с пробками. Мобильные станции гибко реагируют на временные источники, такие как выбросы на строительных площадках в Приморском районе, с автоматической регистрацией PM_{10} . В 2023 году станции активно отслеживали весенние всплески загрязнения, вызванные температурными инверсиями, особенно в плотно застроенных зонах. Автоматизированная корреляция данных с метеопараметрами позволила точно прогнозировать качество воздуха, улучшив экологический контроль [19].

В 2023 году сеть автоматических станций была значительно модернизирована за счёт внедрения передовых технологий. Системы анализа больших данных, применённые на станциях в промышленных районах, таких как Красногвардейский, использовали алгоритмы машинного обучения для прогнозирования пиков PM_{10} . Модернизация системы мониторинга включала тестирование бюджетных автоматических датчиков (AQMesh) в жилых

массивах (Приморский район) для уплотнения наблюдательности сети. Гражданские проекты с датчиками PurpleAir в парковых зонах (Юсуповский сад) дополнили официальные данные, повысив прозрачность. Особенно значимым стало включение данных общественного мониторинга из Курортного района, что позволило расширить зону контроля. Эти инновации повысили эффективность системы мониторинга, поддержав экологическую стратегию города [20].

Автоматические станции мониторинга сталкиваются с техническими сложностями, обусловленными особенностями городской среды. В прибрежных районах, таких как Приморский, повышенная влажность воздуха негативно влияет на точность измерений концентрации взвешенных частиц, требуя применения специальных корректирующих алгоритмов. В промышленных зонах, включая Красногвардейский район, необходимость учета локальных помех от стационарных источников загрязнения делает обязательным проведение дополнительных фоновых измерений. Особое значение приобретает регулярная автоматическая калибровка измерительного оборудования, которая обеспечивает поддержание требуемой точности показаний в условиях изменяющихся внешних факторов. Перспективы развития включают расширение сети за счёт новых автоматических станций в развивающихся районах, таких как намывы Васильевского острова, и внедрение технологий дистанционного зондирования, например, LIDAR, для анализа аэрозолей. В 2023 году начались испытания дронов с автоматическими датчиками для мониторинга в труднодоступных зонах, что может дополнить сеть в будущем [19].

Автоматические станции мониторинга качества атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге формируют высокотехнологичную систему для контроля загрязнения, адаптированную к городской среде. Их классификация, современное оборудование, включая газоанализаторы, пылемеры и метеодатчики, и автоматизированные технологии обеспечивают точный анализ

CO, NO₂, PM и других загрязнителей. Модернизация сети в 2023 году, включая алгоритмы машинного обучения и общественный мониторинг, повысила эффективность системы. Несмотря на вызовы, такие как влажность и необходимость калибровки, сеть остаётся ключевым инструментом для защиты здоровья жителей и устойчивого развития города [19]. Перспективные технологии, такие как дроны и LIDAR, открывают новые горизонты для экологического контроля.

3. Исследование пространственного распределения загрязняющих веществ в весенний период на территории Санкт-Петербурга

В основу работы легли данные, полученные с 25 станций экологического контроля, расположенных в Санкт-Петербурге. Данные о концентрациях загрязняющих веществ находятся в свободном доступе на официальном сайте Комитета по природопользованию и экологической безопасности [18].

3.1 Анализ средних значений загрязняющих веществ

Среднесуточные данные о концентрации загрязняющих веществ усреднены до среднемесячных. В таблицах 5, 6 и 7 приведены среднемесячные значения концентраций загрязняющих веществ в долях ПДК_{СС} за март, апрель и май 2023 г. соответственно.

Обобщённые данные за весь весенний период представлены в таблице 8.

Таблица 5. Среднемесячные концентрации загрязняющих веществ за март

Станция	CO	NO	NO ₂	O ₃	PM10	PM2,5
1	0,13	—	0,37	—	—	0,08
2	0,05	—	0,23	0,24	—	—
3	0,10	—	0,35	—	0,06	—
4	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—
6	0,4	—	0,57	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—
8	0,13	—	0,2	0,36	0,21	0,23
9	0,1	—	0,43	0,37	0,15	—
10	0,09	—	0,19	—	—	—
11	0,06	—	0,15	0,49	—	0,05
12	0,08	—	—	0,30	—	—
13	0,09	—	0,44	—	0,16	—
14	0,1	—	0,38	0,40	0,07	—
15	0,09	—	0,13	0,43	—	0,07
16	0,12	—	0,32	—	—	0,25
17	0,08	—	0,22	0,61	0,15	—
18	0,09	—	0,4	0,34	0,09	—
19	0,12	—	0,46	0,25	0,19	0,29
20	0,16	—	0,29	—	0,14	—
21	0,08	—	0,1	—	0,08	—
22	0,06	—	0,27	—	—	0,14
23	0,11	—	0,32	0,42	—	0,1
24	0,07	—	0,43	0,50	—	0,18
25	0,10	—	—	0,47	—	0,03

Таблица 6. Среднемесячные концентрации загрязняющих веществ за апрель

Станция	CO	NO	NO ₂	O ₃	PM10	PM2,5
1	0,14	—	0,3	—	—	0,15
2	0,04	—	0,17	0,34	—	—
3	0,09	—	0,32	—	0,06	—
4	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—
6	0,16	—	0,43	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—
8	0,12	—	0,16	0,49	0,3	—
9	0,1	—	0,37	0,44	0,17	—
10	0,10	—	0,29	—	—	—
11	0,05	—	0,21	0,56	—	0,1
12	0,07	—	—	—	—	—
13	0,08	—	0,31	—	0,17	—
14	0,10	—	0,31	0,58	0,07	—
15	0,08	—	0,19	0,41	—	0,11
16	0,1	—	0,38	—	—	0,26
17	—	—	—	—	—	—
18	0,07	—	0,34	0,46	0,09	—
19	0,13	—	0,19	0,46	0,46	—
20	0,17	—	0,28	—	0,16	—
21	0,12	—	0,06	—	0,13	—
22	0,07	—	0,33	—	—	0,17
23	0,15	—	0,36	0,5	—	0,13
24	0,1	—	0,42	0,45	—	0,29
25	0,08	—	0,2	0,73	—	0,03

Таблица 7. Среднемесячные концентрации загрязняющих веществ за май

Станция	CO	NO	NO ₂	O ₃	PM10	PM2,5
1	0,16	—	0,27	—	—	0,16
2	0,04	—	0,22	0,43	—	—
3	0,07	—	0,26	—	0,07	—
4	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—
6	0,15	—	0,36	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—
8	0,11	—	0,17	0,51	0,43	0,27
9	0,09	—	0,34	0,51	0,17	—
10	0,06	—	0,12	—	—	—
11	0,04	—	0,09	0,6	—	0,13
12	0,07	—	—	0,48	—	—
13	0,09	—	0,46	—	0,2	—
14	0,09	—	0,29	0,57	0,07	—
15	0,06	—	0,12	0,46	—	0,14
16	0,08	—	0,3	—	—	0,21
17	—	—	—	—	—	—
18	0,07	—	0,33	0,44	0,09	—
19	0,11	—	0,12	0,4	0,34	0,35
20	0,16	—	0,24	—	0,16	—
21	0,09	—	0,11	—	0,1	—
22	0,05	—	0,19	—	—	0,13
23	0,1	—	0,26	0,62	—	0,14
24	0,06	—	0,29	0,64	—	0,23
25	0,09	—	0,25	0,62	—	0,03

Таблица 8. Среднемесячные концентрации загрязняющих веществ за весенний период

Станция	CO	NO	NO ₂	O ₃	PM10	PM2,5
1	0,14	—	—	—	—	—
2	0,04	—	0,21	0,34	—	—
3	0,09	—	0,31	—	0,06	—
4	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—
6	0,24	—	0,45	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—
8	0,12	—	0,18	0,45	0,31	0,25
9	0,10	—	0,38	0,44	0,16	—
10	0,08	—	0,20	—	—	—
11	0,05	—	0,15	0,55	—	0,09
12	0,07	—	—	0,39	—	—
13	0,09	—	0,40	—	0,18	—
14	0,10	—	0,33	0,52	0,07	—
15	0,08	—	0,15	0,43	—	0,11
16	0,10	—	0,33	—	—	0,24
17	0,08	—	0,22	0,61	0,15	—
18	0,08	—	0,36	0,41	0,09	—
19	0,12	—	0,26	0,37	0,33	0,32
20	0,16	—	0,27	—	0,15	—
21	0,10	—	0,09	—	0,10	—
22	0,06	—	0,26	—	—	0,15
23	0,12	—	0,31	0,51	—	0,12
24	0,08	—	0,38	0,53	—	0,23
25	0,09	—	0,23	0,61	—	0,03

На основании данных из таблиц 5, 6, 7 и 8 были построены графики распределения концентраций загрязняющих веществ. Они представлены на рисунках 2 – 10.

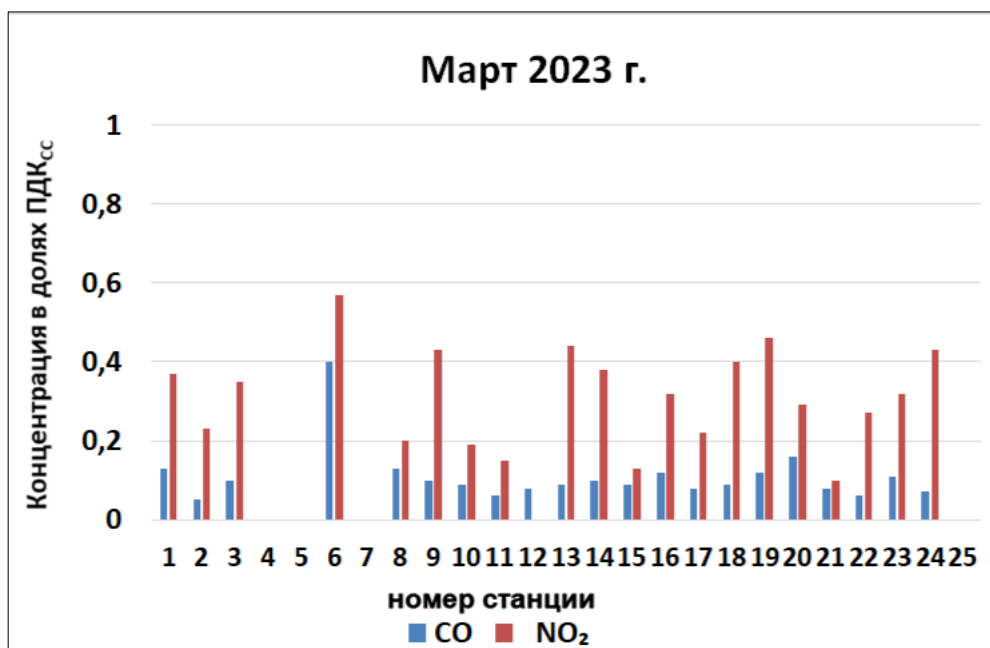


Рисунок 2 – Диаграмма распределения CO, NO₂ в марте

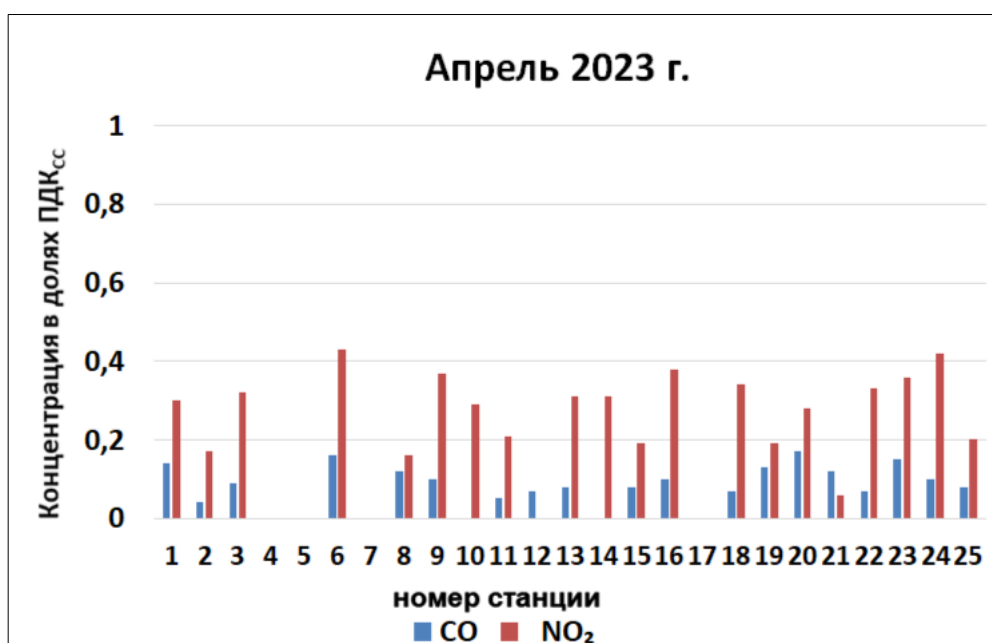


Рисунок 3 – Диаграмма распределения CO, NO₂ в апреле

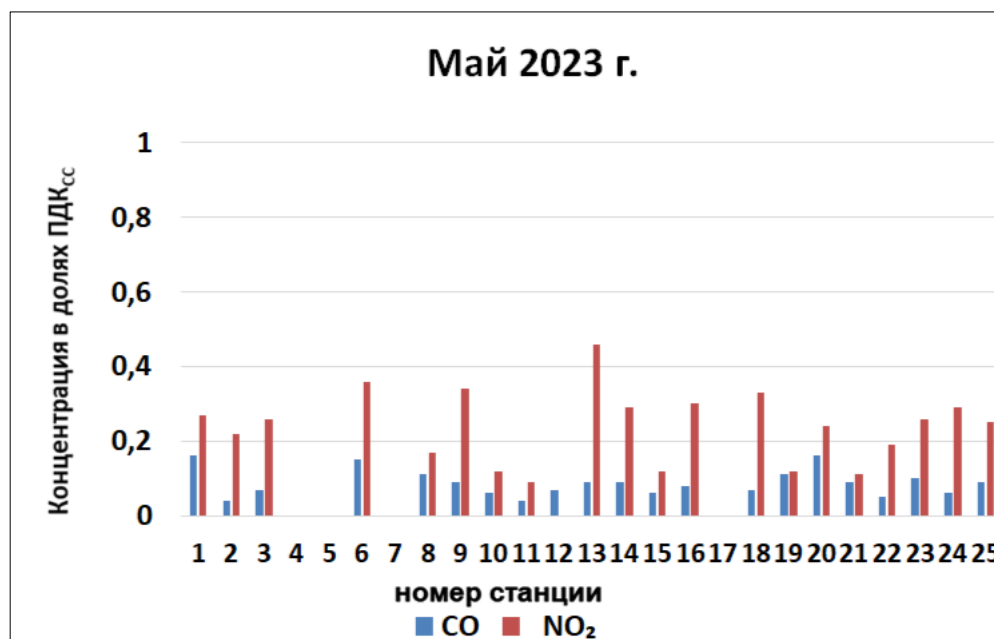


Рисунок 4 – Диаграмма распределения CO, NO₂ в мае

Максимальное значение концентраций CO наблюдалось:

- В марте на станции №6 (пр. КИМа, дом 26 лит. А) и составляло 0,4 ПДК_{СС};
- В апреле на станции №20 (ул. Тельмана, дом 24) и составляло 0,17 ПДК_{СС};
- В мае на станциях №1 (ул. Профессора Попова, дом 48) и №20 (ул. Тельмана, дом 24) и составляло 0,16 ПДК_{СС}.

Минимальные значения концентраций СО в марте, апреле и мае наблюдались на станции №2 (г. Колпино, Красная ул., дом 1А).

В марте 0,05 ПДК_{СС}, в апреле 0,04 ПДК_{СС}, в мае 0,04 ПДК_{СС}.

Максимальное значение концентраций NO₂ наблюдалось:

- В марте на станции №6 (пр. КИМа, дом 26 лит. А) и составляло 0,57 ПДК_{СС};
- В апреле на станции №6 (пр. КИМа, дом 26 лит. А) и составляло 0,43 ПДК_{СС};

- В мае на станциях №13 (шоссе Революции, дом 84) и составляло 0,46 ПДК_{СС}.

Минимальные значения концентраций NO₂ в марте, апреле и мае наблюдались на станции №21 (г. Ломоносов, ул. Федюнинского, дом 3) и №11 (г. Сестрорецк, ул. М.Горького, дом 2)

В марте 0,1 ПДК_{СС} на станции №21, в апреле 0,06 ПДК_{СС} на станции №21, в мае 0,09 ПДК_{СС} на станции №11.

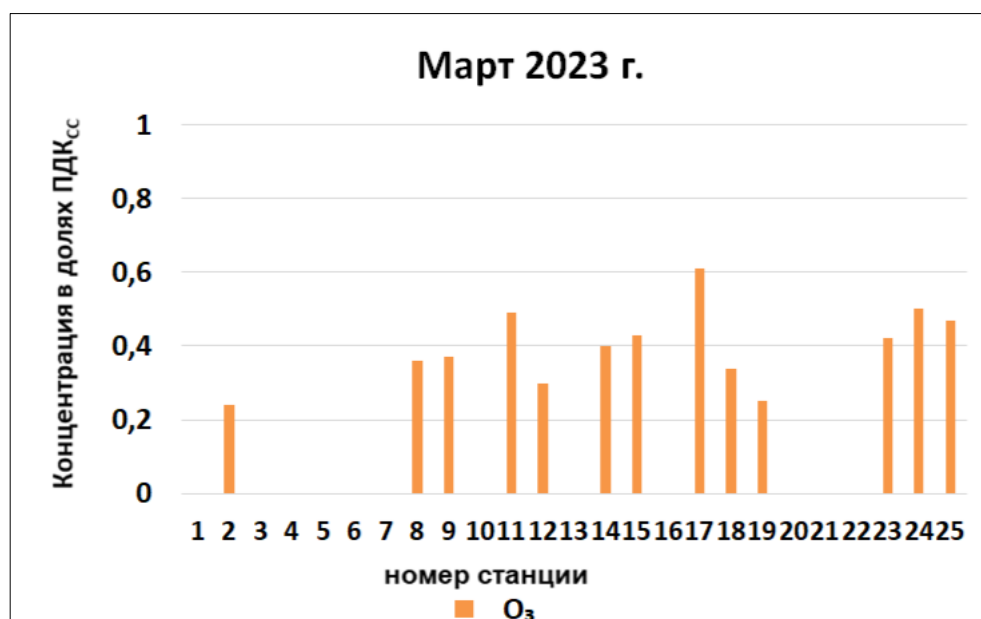


Рисунок 5 – Диаграмма распределения О₃ в марте

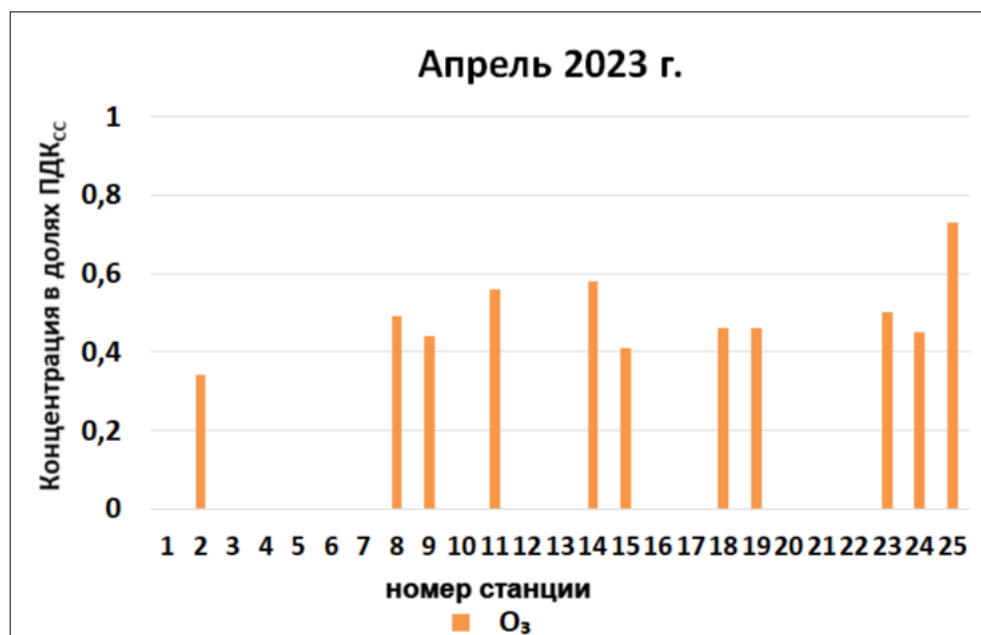


Рисунок 6 – Диаграмма распределения O₃ в апреле

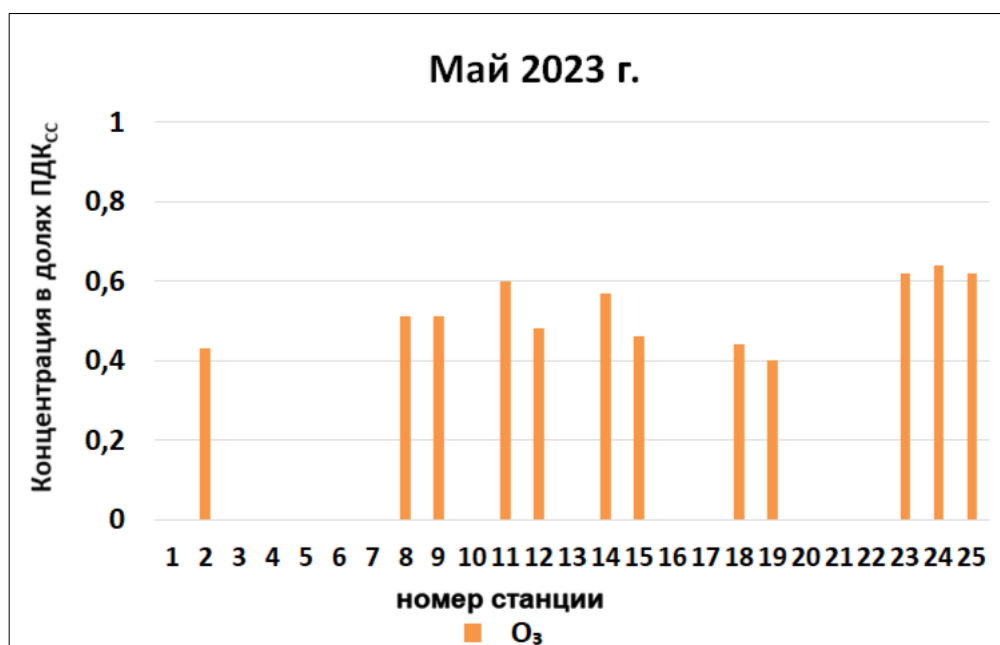


Рисунок 7 – Диаграмма распределения O₃ в мае

Максимальное значение концентраций O₃ наблюдалось:

- В марте на станции №17 (г. Пушкин, Тиньков пер., дом 4) и составляло 0,61 ПДК_{сс};

- В апреле на станции №25 (пос. Металлострой, Железнодорожная ул., дом 13) и составляло 0,73 ПДК_{СС};
- В мае на станциях №24 (В.О. Средний пр., дом 74) и составляло 0,64 ПДК_{СС}.

Минимальные значения концентраций О₃ в марте, апреле и мае наблюдались на станциях №2 (г. Колпино, Красная ул., дом 1А) и № 19 (пр.Ветеранов, дом 167, к. 6/1).

В марте 0,24 ПДК_{СС} на станции №2, в апреле 0,34 ПДК_{СС} на станции №2, в мае 0,4 ПДК_{СС} на станции №19.

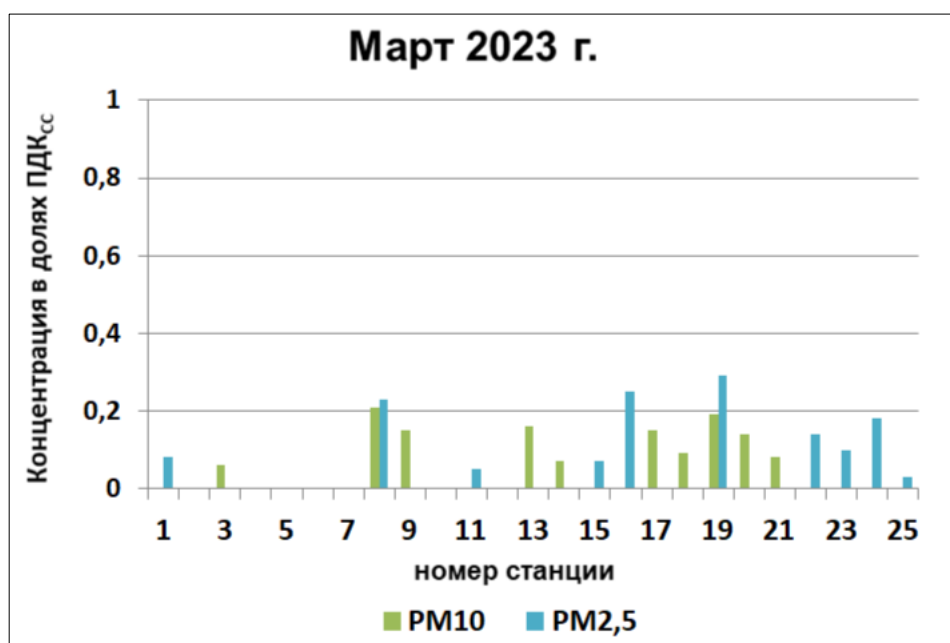


Рисунок 8 – Диаграмма распределения PM10, PM2,5 в марте

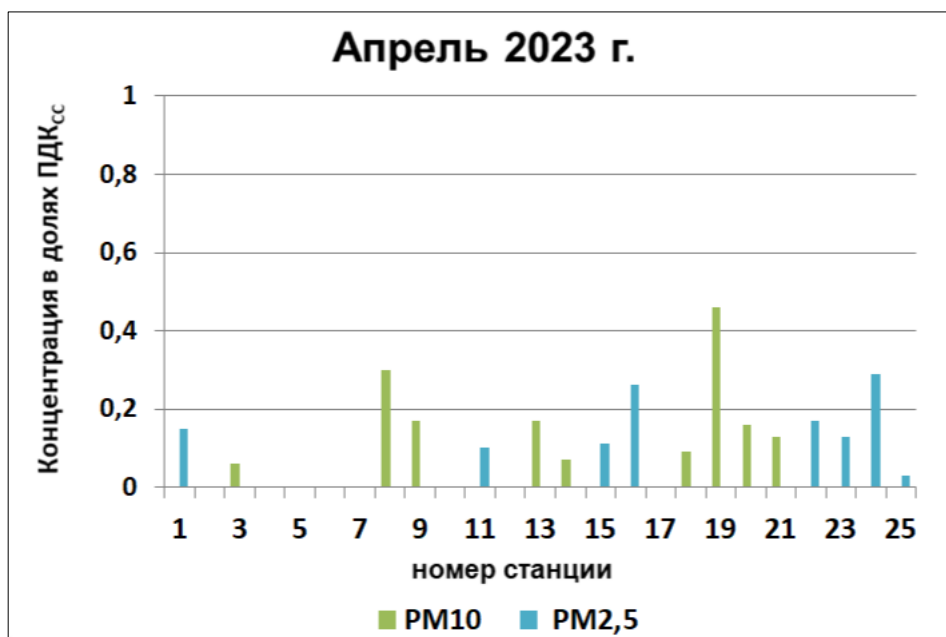


Рисунок 9 – Диаграмма распределения PM10, PM2,5 в апреле

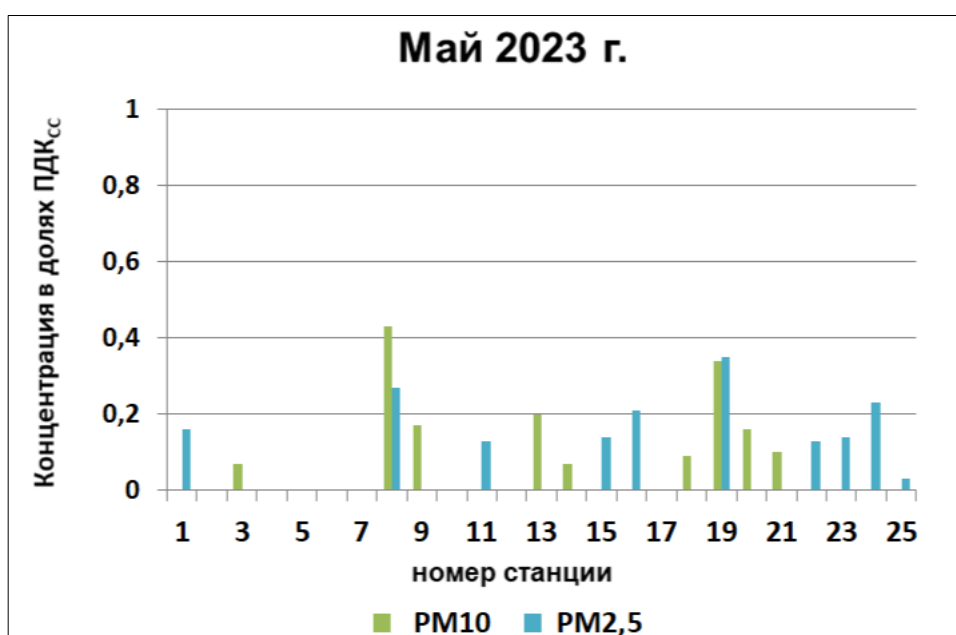


Рисунок 10 – Диаграмма распределения PM10, PM2,5 в мае

Максимальное значение концентраций PM10 наблюдалось:

- В марте на станции №8 (ул. Новосельковская, дом 23) и составляло 0,21 ПДК_{cc};

- В апреле на станции №19 (пр.Ветеранов, дом 167, к. 6/1) и составляло 0,46 ПДК_{СС};
- В мае на станциях №8 (ул. Новосельковская, дом 23) и составляло 0,43 ПДК_{СС}.

Минимальные значения концентраций РМ10 в марте, апреле и мае наблюдались на станции №3 (ул. Карбышева, дом 7).

В марте 0,06 ПДК_{СС}, в апреле 0,06 ПДК_{СС}, в мае 0,07 ПДК_{СС}.

Максимальное значение концентраций РМ2,5 наблюдалось:

- В марте на станции №19 (пр.Ветеранов, дом 167, к. 6/1) и составляло 0,29 ПДК_{СС};
- В апреле на станции №24 (В.О. Средний пр., дом 74) и составляло 0,29 ПДК_{СС};
- В мае на станциях №19 (пр.Ветеранов, дом 167, к. 6/1) и составляло 0,35 ПДК_{СС}.

Минимальные значения концентраций РМ2,5 в марте, апреле и мае наблюдались на станции №25 (пос. Металлострой, Железнодорожная ул., дом 13)

В марте 0,03 ПДК_{СС}, в апреле 0,03 ПДК_{СС}, в мае 0,03 ПДК_{СС}.

В таблице 9 представлены станции с минимальными и максимальными концентрациями загрязняющих веществ за весенний период.

Таблица 9. Максимальные и минимальные концентрации загрязняющих веществ на станциях

Месяц	Максимальные значения концентраций					Минимальные значения концентраций				
	CO	NO ₂	O ₃	PM10	PM2,5	CO	NO ₂	O ₃	PM10	PM2,5
Март	№6	№6	№17	№8	№19	№2	№21	№2	№3	№25
Апрель	№20	№6	№25	№19	№24	№2	№21	№2	№3	№25
Май	№1	№13	№24	№8	№19	№2	№11	№19	№3	№25

Анализ данных таблицы 9 показал, что максимальный уровень загрязнения зафиксирован на станциях №6 и №19, расположенных в Василеостровском и Красносельском районах соответственно.

Наименьшие концентрации загрязняющих веществ отмечены на станции №2, находящейся в городе Колпино.

3.2 Построение полей пространственного распределения концентраций загрязняющих веществ

Для визуализации пространственного распределения концентраций загрязняющих веществ (CO, NO₂) использовался программный пакет Surfer 9, с помощью которого были построены карты изолиний и трёхмерные модели.

На рисунках 11, 12, 13 представлены карты изолиний концентраций CO и 3D-модели распределения данного загрязнителя за март, апрель и май соответственно.

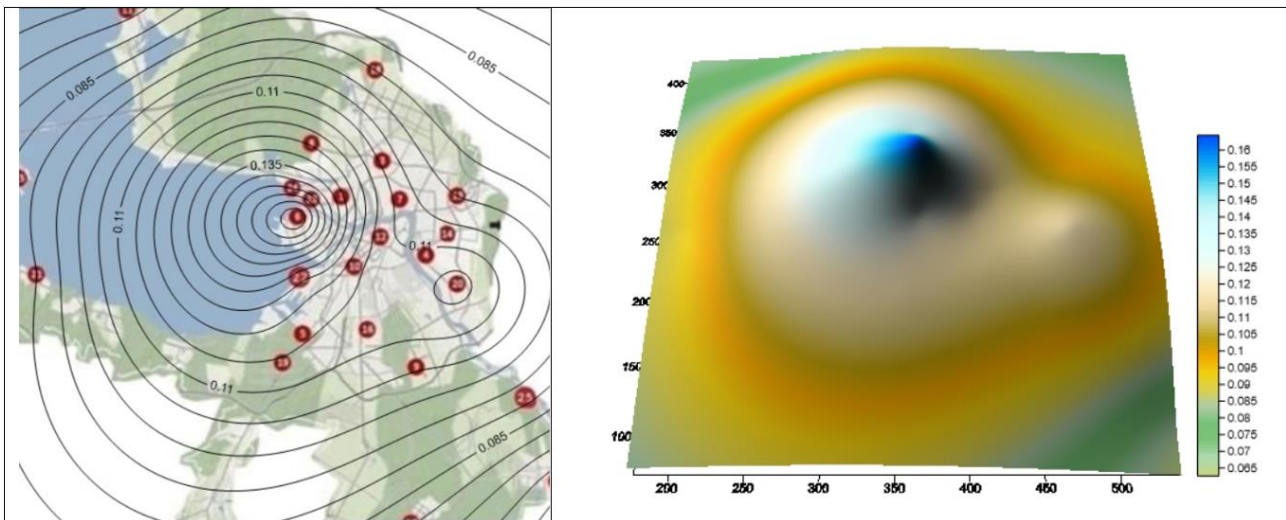


Рисунок 11 – Пространственное распределение СО за март
а) изолинии; б) 3D изображение

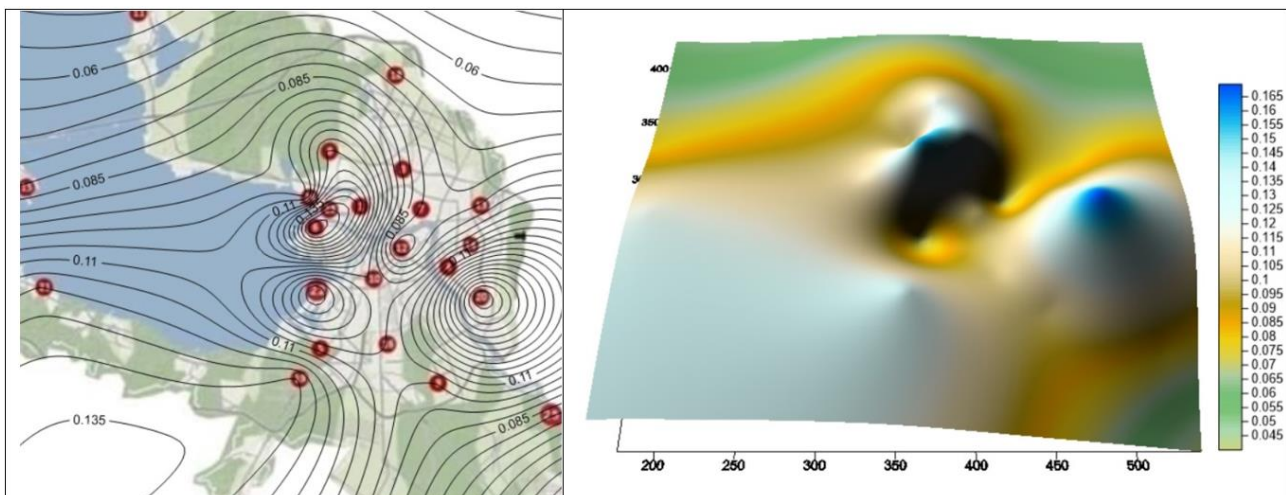


Рисунок 12 – Пространственное распределение СО за апрель
а) изолинии; б) 3D изображение

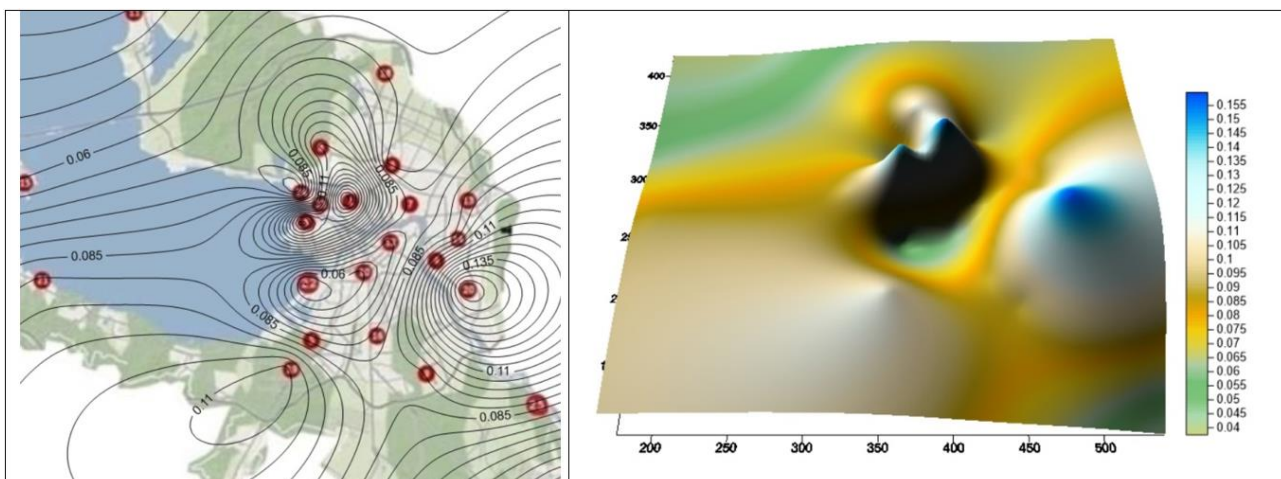


Рисунок 13 – Пространственное распределение СО за май

а) изолинии; б) 3D изображение

Анализ графических данных показал, что в течение всего исследуемого периода фактические концентрации СО оставались ниже установленного норматива.

Диапазон колебаний значений составил от 0,04 до 0,17 ПДК_{СС}, превышений ПДК_{СС} зафиксировано не было.

Местоположение максимума за все три месяца оставалось одним и тем же и наблюдалось в центральной части города.

Наибольшие загрязнения наблюдались в Василеостровском районе.

Наименее загрязнённым оказался Курортный район.

Анализ уровня загрязнения атмосферы оксидом углерода показал следующее:

1. Наибольшие концентрации СО зафиксированы в марте (среднее значение 0,11 ПДК_{СС})
2. Показатели апреля (0,1 ПДК_{СС}) и мая (0,09 ПДК_{СС}) демонстрируют незначительные отличия

3. Все значения существенно ниже установленного норматива ПДК_{СС} (3 ПДК_{СС})

На рисунках 14, 15, 16 представлены карты изолиний концентраций NO₂ и 3D-модели распределения данного загрязнителя за март, апрель и май соответственно.

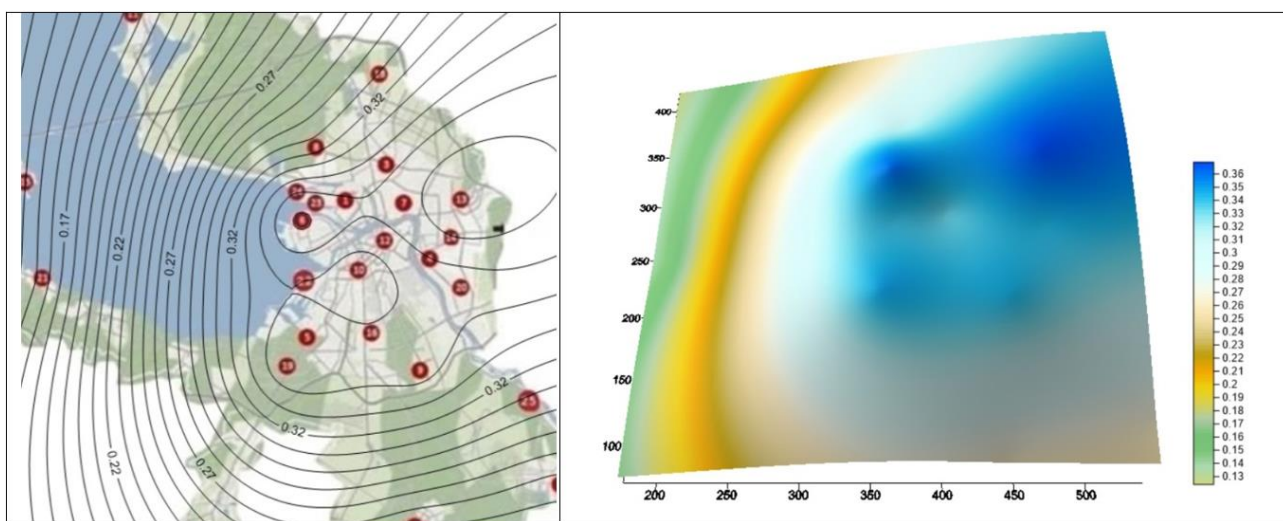


Рисунок 14 – Пространственное распределение NO₂ за март
а) изолинии; б) 3D изображение

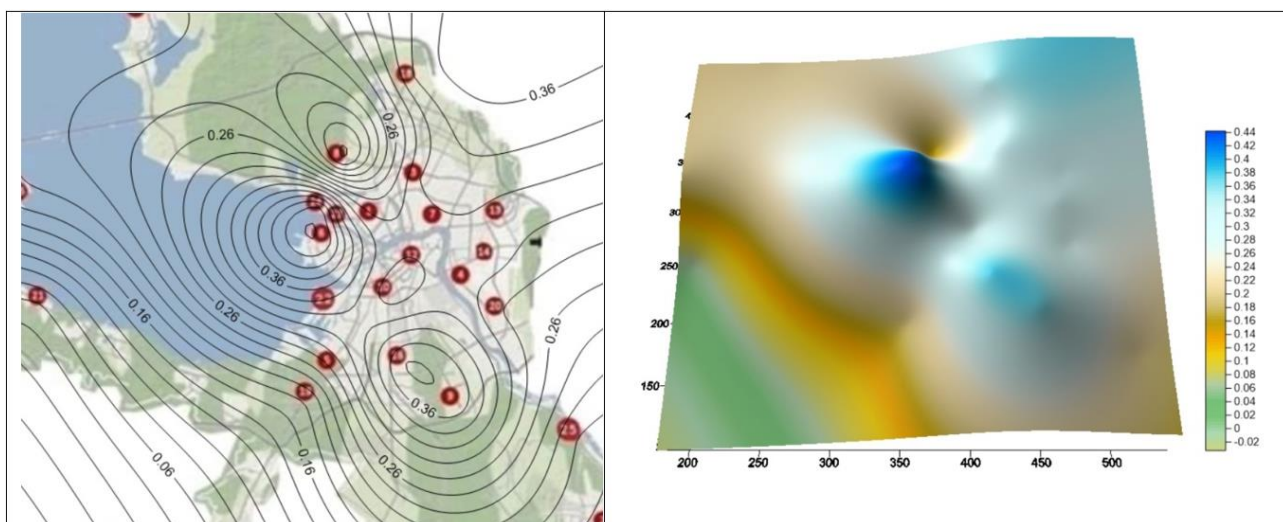


Рисунок 15 – Пространственное распределение NO₂ за апрель

а) изолинии; б) 3D изображение

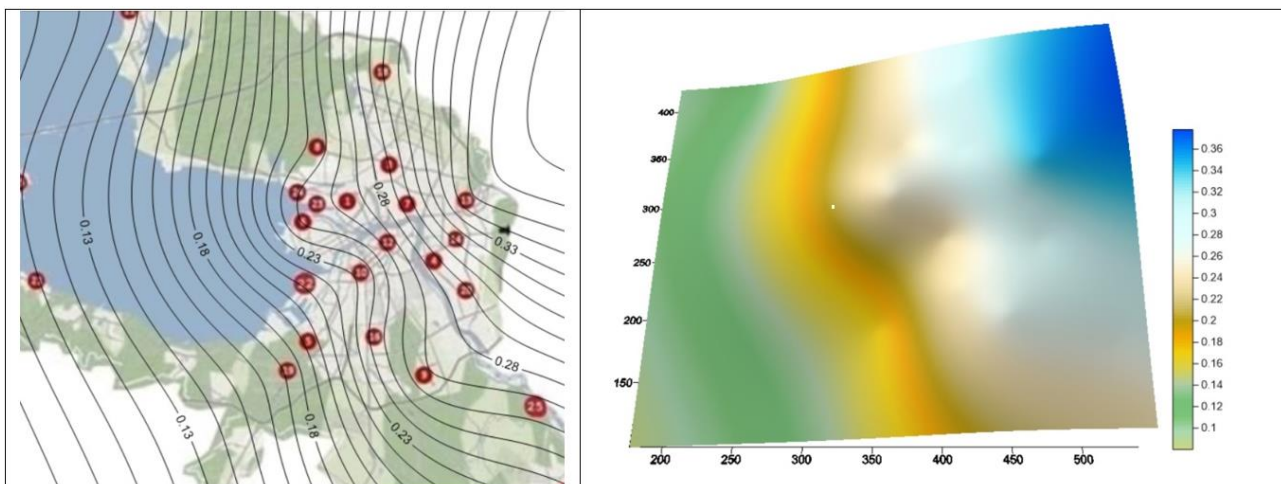


Рисунок 16 – Пространственное распределение NO₂ за май

а) изолинии; б) 3D изображение

Согласно нормативам, предельно допустимая среднесуточная концентрация (ПДК_{СС}) диоксида азота (NO₂) в атмосферном воздухе населённых пунктов установлена на уровне 0,04 ПДК_{СС}.

Анализ графических данных показал, что в течение всего исследуемого периода фактические концентрации СО оставались ниже установленного норматива.

Диапазон колебаний значений составил от 0,04 до 0,17 ПДК_{СС}, превышений ПДК_{СС} зафиксировано не было.

Наибольшие загрязнения наблюдались в Василеостровском районе.

Наименее загрязнённым оказался Курортный район.

Анализ уровня загрязнения атмосферы оксидом углерода показал следующее:

1. Наибольшие концентрации СО зафиксированы в марте (среднее значение 0,11 ПДК_{СС})

2. Показатели апреля (0,1 ПДК_{СС}) и мая (0,09 ПДК_{СС}) демонстрируют незначительные отличия
3. Все значения существенно ниже установленного норматива ПДК_{СС} (3 ПДК_{СС})

3.3 Выявление зависимости между распределением загрязняющих веществ и метеорологическими параметрами

Метеорологические данные для исследования были получены с официального портала ФГБУ «Северо-Западное УГМС» (Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды) [22].

Характеристика климатических условий сезона.

Весна в регионе, длящаяся с середины марта до начала июня, отличается высокой изменчивостью погодных условий. Характерными особенностями являются резкие температурные контрасты – от ранних летних потеплений (до 25-30 °С при южных воздушных массах) до поздних заморозков при арктических вторжениях. Этот сезон характеризуется минимальной облачностью, наименьшим количеством осадков и более спокойными ветрами по сравнению с зимним периодом.

Обзор погоды за март 2023 года

В начале месяца Санкт-Петербург находился под влиянием циклона — частые осадки, высокая влажность и порывистый ветер до 13 м/с сопровождалась температурами -9...0 °С. Во второй декаде установился антициклон с ясной и более сухой погодой, Температура воздуха составляла -7...5 °С. К концу месяца вновь пришёл циклон с дождями до 13 мм, усилением ветра до 15 м/с и температурой воздуха 0...5 °С. Среднемесячная температура марта оказалась близкой к норме.

Анализ температурной инверсии за март 2023 года

В марте 2023 года всего было 29 инверсий, средняя интенсивность составляла 2,03°C, а максимальная интенсивность – 6°C. Среднее значение мощности наблюдалось на высоте 231,28 м. Наземные инверсии составляли 41,40 % от всех инверсий, а приподнятые инверсии – 58,60 %, их было 12 и 17 соответственно. Средняя интенсивность наземных инверсий равнялась 2,94°C, а приподнятых – 1,39°C.

На то, что март оказался самым загрязненным месяцем, повлияла температура воздуха, которая в течение месяца была выше среднего многолетнего значения и большое количество температурных инверсий, которые повлияли на увеличение концентрации загрязняющих веществ.

Обзор погоды за апрель 2023 года.

Апрель 2023 года в Санкт-Петербурге выдался тёплым и преимущественно без осадков. В начале месяца прошли небольшие осадки, но уже с 5 апреля установилась продолжительная антициклональная погода с ясным небом, оптимальной влажностью и слабым ветром, но умеренными порывами. Температура воздуха доходила до 17 °C. В целом месяц оказался теплее и суше климатической нормы.

В апреле 2023 года всего было 37 инверсий, средняя интенсивность составляла 3,33 °C, а максимальная интенсивность – 9,20°C. Среднее значение мощности наблюдалось на высоте 298,51 м. Наземные инверсии составляли 59,50 % от всех инверсий, а приподнятые инверсии – 40,50 %, их было 22 и 15 соответственно. Средняя интенсивность наземных инверсий равнялась 4,30°C, а приподнятых – 1,91°C.

Концентрации загрязняющих веществ в апреле превышали майские значения, но оставались ниже мартовских. В отличие от тёплого марта, температурный режим апреля соответствовал средним многолетним значениям,

другие параметры – скорость ветра и осадки – также не выходили за пределы климатической нормы.

Обзор погоды за май 2023 года.

В первой декаде месяца наблюдались осадки общей величиной до 4 мм), сопровождаемые порывами юго-западного ветра до 15 м/с и пониженные среднесуточные температуры +6...+11 °С. Погоду второй декады определял антициклон: преимущественно без осадков, порывы ветра достигали 13 м/с, а температура достигала +13...+17 °С. Начиная с третьей декады, незначительно усилились осадки. В целом среднемесячные показатели температуры и осадков превысили многолетние климатические нормы, что свидетельствует о смещении весенних ветровых и осадочных режимов в сторону более тёплых и дождливых условий.

В мае 2023 года всего было 13 инверсий, средняя интенсивность составляла 2,43 °С, а максимальная интенсивность – 5,60°С. Среднее значение мощности наблюдалось на высоте 247,77 м. Наземные инверсии составляли 53,80 % от всех инверсий, а приподнятые инверсии – 46,20 %, их было 7 и 6 соответственно. Средняя интенсивность наземных инверсий равнялась 2,96°С, а приподнятых – 1,82°С.

Минимальные концентрации загрязнений в мае объясняются небольшим количеством температурных инверсий, даже при небольших осадках и стандартном для сезона температурном фоне.

Заключение

Санкт-Петербург, как и другие мегаполисы, сталкивается с серьёзной экологической проблемой – высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха. Это обусловлено воздействием промышленных и автотранспортных выбросов, при чём последние играют доминирующую роль в формировании неблагоприятной экологической обстановки. Данная ситуация отражает общемировую тенденцию урбанизированных территорий с развитой промышленной инфраструктурой и высокой транспортной нагрузкой.

В рамках данной работы проанализировано пространственное распределение загрязняющих веществ на территории Санкт-Петербурга в течение весенних месяцев 2023 года (март, апрель, май).

В ходе исследования, используя данные автоматизированных станций мониторинга, были построены таблицы и диаграммы со среднемесячными концентрациями загрязняющих веществ. Для визуализации созданы картографические материалы, включающие изолинии пространственного распределения и трёхмерные модели полей загрязнения.

Анализ представленных данных позволил выявить характерные особенности загрязнения атмосферы в весенний период. Среди исследуемых месяцев наиболее загрязнённым оказался март, в этом месяце наблюдался повышенный температурный фон и большое количество температурных инверсий. В течение всего наблюдаемого периода концентрации диоксида азота и угарного газа не превышали ПДК_{СС}. Максимальные концентрации загрязняющих веществ характерны для станций мониторинга, расположенных в центральных районах Санкт-Петербурга с высокой плотностью промышленных

предприятий и транспортной инфраструктуры. Напротив, минимальные уровни загрязнения зафиксированы в городе Колпино, что обусловлено отсутствием большого количества крупных промышленных объектов.

Рост количества автотранспорта и развитие промышленного сектора неизбежно приводят к увеличению объёма вредных выбросов в атмосферу города. В сложившейся ситуации требуется комплексный подход к улучшению качества городского воздуха. Первоочерёдными мерами должны стать оптимизация транспортной инфраструктуры через строительство новых магистралей, модернизация промышленного производства с переходом на экологически безопасные технологии и сырьё, внедрение современных систем газоочистки на предприятиях, а также расширение зелёных зон за счёт создания новых парков и аллей. Эти инициативы в совокупности позволят смягчить негативное воздействие антропогенных факторов на городскую экосистему.

Список использованной литературы

1. Матвеев Л. Т. Физика атмосферы: Курс общей метеорологии. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. 752 с.
2. Седунов Ю. С. Справочник по атмосфере. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. 504 с.
3. Беккер А. А., Агаев Т. Б. Контроль и защита природной среды от загрязнения. Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. 286 с.
4. Мазур И. И., Молдаванов О. И. Инженерная экология: Учебное пособие для вузов. Москва: Высшая школа, 1999. 447 с.
5. Стадницкий Г. В., Родионов А. И. Экология: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Химия, 1997. 240 с.
6. Ахметов Н. С. Неорганическая и общая химия: Учебник для вузов. Москва: Высшая школа; Издательский центр «Академия», 2001. 743 с.
7. Росляков П. В., Ионкин И. Л., Закиров И. А. и др. Контроль выбросов тепловых электростанций в атмосферу: Учебное пособие. Москва: Издательство МЭИ, 2004. 228 с.
8. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. 645 с.
9. Крюкова С. В. Анализ данных загрязнения природной среды: Лабораторный практикум. Санкт-Петербург: РГГМУ, 2014. 45 с.
10. ГН 2.1.6.1338-03. Нормативы предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ в воздухе населённых мест. Москва, 2003. 41 с.
11. Бретшнайдер Б., Курфорст И. Технологии и контроль защиты воздушного бассейна: Пер. с англ. под ред. Туболкина А. Ф. Ленинград: Химия, 1989. 288 с.
12. Израэль Ю. А. Контроль и экология окружающей среды. Москва: Гидрометеиздат, 1984. 375 с.

13. Потапов А. И., Воробьёв В. Н., Карлин Л. Н., Музалевский А. А. Мониторинг окружающей среды: Управление и контроль качества. Часть 1. Санкт-Петербург: РГГМУ, 2002. 432 с.
14. Шимова О. С., Соколовский Н. К. Экономика природопользования и основы экологии: Учебник. Минск: БГЭУ, 2002. 367 с.
15. Веницинов Е. В. и др. Экологический мониторинг: Пошаговое руководство. Москва: РХТУ им. Менделеева, 2003. 252 с.
16. Горшков М. В. Экологический мониторинг: Учебное пособие. Владивосток: Издательство ТГЭУ, 2010. 313 с.
17. Герасимов Б. И., Коробейников И. В. и др. Приборы и методы экологического мониторинга. Тамбов: Издательство ТГТУ, 1996. 111 с.
18. Экологический портал Санкт-Петербурга. URL: <http://www.infoeco.ru/> (дата обращения: 15.05.2025).
19. Соколов В. А. Газоанализаторы и пылемеры для контроля загрязнения воздуха. Ленинград: Март, 2007. URL: http://www.rmo.ru/ru/nmoborudovanie/nmoborudovanie/20071/75_78_OTA_01_2007.pdf (дата обращения: 16.05.2025).
20. ОПТЭК. Анализаторы для научных исследований и промышленности. URL: <http://www.optec.ru/> (дата обращения: 16.05.2025).
21. ООО «Мониторинг». URL: <http://www.ooo-monitoring.ru/> (дата обращения: 16.05.2025).
22. ФГБУ «Северо-Западное УГМС». Официальный портал. URL: <http://www.meteo.nw.ru/> (дата обращения: 18.05.2025).