



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

**Кафедра геоэкологии, природопользования и экологической  
безопасности**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

На тему **Пространственное распределение концентраций  
загрязняющих веществ в атмосфере Санкт-  
Петербурга**

Исполнитель **Чернышов Владимир Денисович**

Руководитель кандидат биологических наук, доцент  
**Мухин Иван Андреевич**

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

кандидат биологических наук, доцент  
**Мухин Иван Андреевич**

«11» июня 2025 г.

## Оглавление

Введение .....	3
1. Загрязнение воздуха в городской среде.....	3
1.1 Источники загрязнения воздуха в городской среде .....	3
1.2 Загрязняющие вещества атмосферного воздуха в городской среде и их характеристика .....	7
1.3 Особенности городской среды, влияющие на распространение загрязнений .....	10
2. Материалы и методы исследования.....	23
2.1 Методы анализа и обработки информации.....	23
2.2 Характеристика расположения точек наблюдения .....	29
3. Анализ пространственного загрязнения воздуха в городской среде .	36
3.1 Пространственное распределение загрязняющих веществ .....	36
3.2 Влияние плотности и высоты застройки на распределение загрязнителя.....	38
3.3 Связь факторов загрязнения с метеорологическими условиями..	42
Заключение.....	48
Литературные источники.....	51

## ВВЕДЕНИЕ

### 1. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

#### 1.1 Источники загрязнения воздуха в городской среде

Изучение загрязнения атмосферного воздуха, под которым понимается изменение его физико-химических свойств, негативно влияющее на экосистемы и здоровье живых организмов, требует комплексного анализа происхождения загрязняющих примесей. В научной литературе источники загрязнения традиционно разделяют на естественные (природные) и антропогенные (обусловленные деятельностью человека). Кроме того, их классифицируют по масштабу распространения:

*Локальный уровень* – повышенная концентрация загрязнителей на ограниченной территории (например, вблизи промышленных объектов);

*Региональный уровень* – распространение вредных веществ на значительных площадях (например, трансграничный перенос выбросов);

*Глобальный уровень* – изменения, затрагивающие всю атмосферу [1].

Естественные источники включают природные процессы, не связанные с антропогенным воздействием. К ним относятся:

К естественным источникам в городе относятся пыльные бури, болото и вулканы. Пыльные бури, возникающие за городом, переносят песок и пыль.

В городских условиях качество воздуха формируется под влиянием различных природных факторов, которые создают фоновый уровень загрязнения. Одним из таких факторов являются пыльные бури, возникающие в засушливых регионах. Эти атмосферные явления переносят огромное количество мелких частиц почвы, содержащих минеральные и органические вещества. Попадая в городскую атмосферу, эти частицы значительно ухудшают качество воздуха и могут вызывать проблемы с дыханием у жителей.

Вулканическая деятельность, хотя и не характерна для большинства городских территорий, оказывает глобальное воздействие на атмосферу. Во

время извержений в воздух попадают вулканический пепел, различные соединения серы и углекислый газ. Эти вещества способны распространяться на огромные расстояния, влияя на климат и качество воздуха в отдаленных регионах. Даже при отсутствии вулканов в непосредственной близости от города, их выбросы могут достигать урбанизированных территорий через атмосферные потоки.

Лесные и степные пожары представляют серьезную угрозу для качества городского воздуха. В результате горения растительности образуется большое количество дыма, содержащего вредные вещества. Этот дым может распространяться на значительные расстояния, создавая смог над городами. Особенно опасны такие ситуации в летний период, когда жаркая и сухая погода способствует возникновению и распространению пожаров [2].

Природные биологические процессы также вносят свой вклад в состав городской атмосферы. Болотные экосистемы выделяют метан - газ, который образуется при разложении органических веществ без доступа кислорода. В период цветения растений в воздухе появляется большое количество пыльцы, что может вызывать аллергические реакции у горожан. Кроме того, с поверхности морей и океанов в атмосферу попадают микроскопические кристаллы солей, которые также влияют на качество воздуха.

Эти естественные источники загрязнения взаимодействуют с антропогенными факторами, создавая сложную картину состояния городской атмосферы. В отличие от промышленных выбросов, на природные источники человек может повлиять лишь косвенно, через мероприятия по охране окружающей среды и контроль за использованием природных ресурсов.

Энергетический комплекс. Тепловые электростанции, использующие уголь и мазут, выделяют продукты полного и неполного сгорания, а также твёрдые частицы (зола, сажа). Применение природного газа снижает выбросы твёрдых примесей в 3–5 раз по сравнению с углём, однако не решает проблему эмиссии оксидов серы и азота. Атомные электростанции становятся источниками радиоактивных газов (криптон, ксенон) и аэрозолей.

Металлургическая промышленность. В чёрной металлургии выплавка стали сопровождается выбросами оксидов углерода, серы, тяжёлых металлов (свинец, ртуть), а также токсичных органических соединений (фенол, формальдегид). В цветной металлургии переработка руд приводит к эмиссии диоксида серы, меди и цинка.

Химическая промышленность. Несмотря на малый объём выбросов (около 2% от общего промышленного загрязнения), данная отрасль опасна высокой токсичностью веществ: хлор, аммиак, сероводород и органические растворители.

Автотранспорт. Выхлопные газы содержат оксиды азота, угарный газ, бензпирен и альдегиды. Использование каталитических нейтрализаторов и регулировка топливных систем позволяют снизить токсичность выбросов в 1,5–6 раз.

Сельское хозяйство. Основные источники загрязнения - пыль при обработке почвы, метан от животноводческих ферм, аммиак и пестициды при обработке полей.

Классификация загрязняющих веществ базируется на их происхождении, типе воздействия и агрегатном состоянии. По происхождению выделяют:

Первичные загрязняющие вещества - поступают в атмосферу напрямую из источников.

Вторичные загрязняющие вещества - образуются в результате химических реакций первичных веществ, обладая повышенной токсичностью.

По типу воздействия загрязняющие вещества делятся на:

- Химические (тяжёлые металлы, диоксины), формирующиеся при сжигании топлива и промышленных процессах;
- Физические - тепловые (нагретые газы), шумовые, электромагнитные и радиоактивные загрязнения;

Биологические (микотоксины, аллергены).

По агрегатному состоянию загрязняющие вещества классифицируют как:

- Газообразные (оксид углерода, диоксид азота, летучие органические соединения);
- Твёрдые (пыль, сажа, металлические частицы);
- Жидкие (кислотные аэрозоли, растворы солей).

Таким образом, антропогенные источники, в отличие от естественных, характеризуются высокой интенсивностью и разнообразием загрязняющих веществ, что требует разработки систем мониторинга и технологий снижения выбросов [3].

## 1.2 Загрязняющие вещества атмосферного воздуха в городской среде и их характеристика

Атмосферный воздух – это сложная динамическая система газов, формирующая защитную оболочку Земли и обеспечивающая условия для жизни. Его состав относительно постоянен: около 78% занимает азот ( $N_2$ ), 21% – кислород ( $O_2$ ), 0,93% – аргон ( $Ar$ ), а оставшаяся часть приходится на углекислый газ ( $CO_2$ ), неон, гелий, метан, криптон и другие примеси (рисунок 1). Однако даже незначительные изменения в концентрациях этих веществ могут оказывать серьезное влияние на экосистемы, климат и здоровье человека [4].

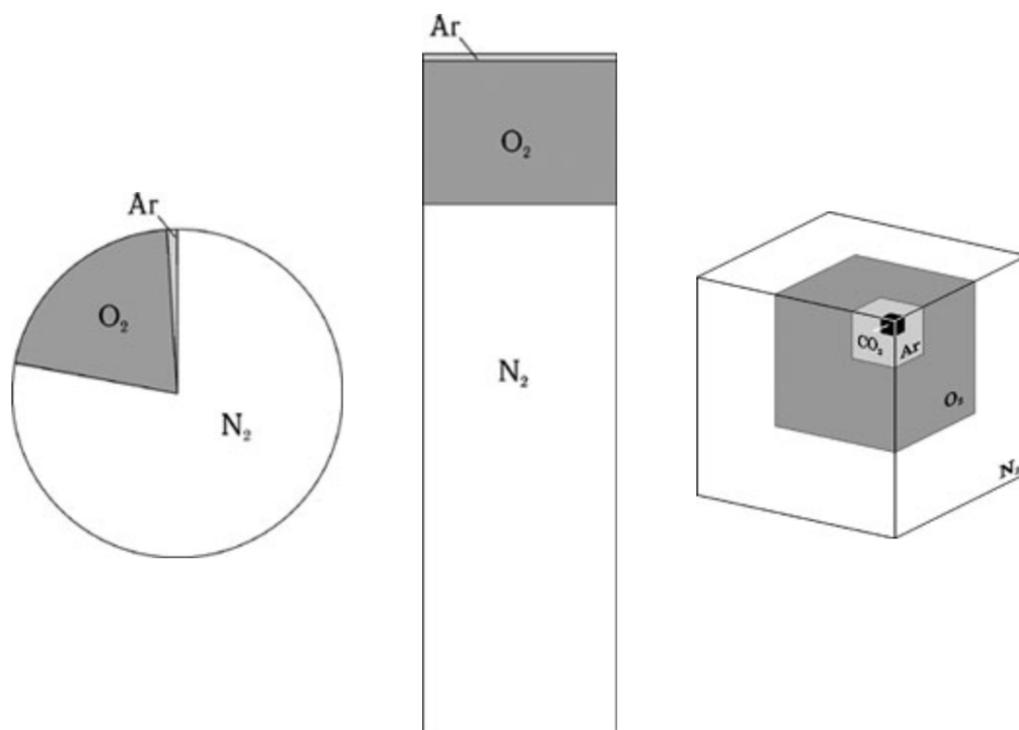


Рисунок 1 – Диаграммы содержания азота, кислорода и аргона в атмосфере [5].

### *Основные загрязнители атмосферы и их воздействие*

Загрязнение воздуха происходит из-за поступления в него вредных химических соединений, которые могут иметь как природное (вулканическая деятельность, лесные пожары), так и антропогенное происхождение

(промышленность, транспорт, энергетика). Наиболее опасными для человека и окружающей среды являются следующие вещества:

### *1. Угарный газ (CO)*

Угарный газ – это бесцветный, без запаха и вкуса газ, образующийся при неполном сгорании органического топлива. Он обладает высокой токсичностью, поскольку связывается с гемоглобином крови в 200-300 раз активнее, чем кислород, блокируя его транспортировку к тканям. Это приводит к гипоксии (кислородному голоданию), головокружению, потере сознания и даже смерти.

Опасность угарного газа заключается в том, что он не обнаруживается без специальных приборов. В городах его основными источниками являются автомобильные выхлопы (особенно при работе двигателя на холостом ходу), промышленные выбросы и пожары. Даже при концентрации 0,02-0,05% у человека появляются симптомы отравления, а при 1% смерть наступает в течение нескольких минут.

### *2. Углекислый газ (CO<sub>2</sub>)*

Углекислый газ является естественным компонентом атмосферы, его концентрация неуклонно растет из-за сжигания ископаемого топлива, вырубки лесов и промышленных процессов. С начала промышленной революции (с 1750 года) его содержание увеличилось более чем на 50% – с 280 ppm (частей на миллион) до 420 ppm в 2023 году. Повышенный уровень углекислого газа приводит не только к глобальному потеплению, но и оказывает прямое воздействие на человека: при концентрации 3-5% появляется головная боль, учащенное сердцебиение и одышка. При 7-10% наступает потеря сознания и возможен летальный исход. В закрытых помещениях (например, шахтах) углекислый газ может скапливаться в нижних слоях из-за своей большей плотности по сравнению с воздухом.

### *3. Оксиды азота (NO)*

В атмосфере присутствуют различные формы азотистых соединений, но наибольшую опасность представляют:

*Оксид азота (NO)* – образуется при высокотемпературных процессах (двигатели внутреннего сгорания, электростанции).

*Диоксид азота (NO<sub>2</sub>)* – Двуокись азота представляет собой токсичный газ красно-бурого цвета с характерным резким запахом. Это химически активное соединение, которое образуется преимущественно в процессах высокотемпературного горения - при работе автомобильных двигателей, промышленных котлов и тепловых электростанций. Диоксид азота обладает выраженным раздражающим действием на дыхательную систему человека. Даже при кратковременном воздействии в концентрациях 0,5-1,0 мг/м<sup>3</sup> он вызывает раздражение слизистых оболочек глаз и верхних дыхательных путей. При более длительном воздействии или повышенных концентрациях (свыше 2 мг/м<sup>3</sup>) может развиваться токсический отёк лёгких, а при хроническом воздействии - хронический бронхит и эмфизема лёгких. Особую опасность диоксид азота представляет как компонент фотохимического смога. Под действием солнечного света он вступает в реакции с углеводородами, образуя новые токсичные соединения, включая озон. Кроме того, диоксид азота является одним из основных виновников кислотных дождей - при взаимодействии с водой он образует азотистую и азотную кислоты [6].

Согласно исследованиям Всемирной организации здравоохранения, длительное воздействие диоксида азота в концентрациях, характерных для крупных городов, увеличивает риск респираторных заболеваний на 20%, а у детей может приводить к задержке развития лёгочной системы.

#### *Глобальные последствия загрязнения воздуха*

Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, загрязнение воздуха ежегодно приводит к 7 миллионам преждевременных смертей. Основные заболевания, связанные с этим:

- Инсульты (34% случаев);
- Ишемическая болезнь сердца (24%);
- Хронические обструктивные болезни легких (22%);

- Рак легких (8%) [7].

Кроме того, загрязнение атмосферы ускоряет коррозию металлов, разрушение строительных материалов (из-за кислотных осадков) и снижает урожайность сельскохозяйственных культур.

Атмосферный воздух – это не просто смесь газов, а хрупкая система, от которой зависит жизнь на Земле. Увеличение концентрации токсичных веществ, приводит к тяжелым последствиям для здоровья людей и экосистем. Решение этой проблемы требует комплексного подхода: внедрения чистых технологий, развития возобновляемой энергетики и ужесточения экологических стандартов [8].

### **1.3 Особенности городской среды, влияющие на распространение загрязнений**

Современный город представляет собой динамичную и многослойную систему, объединяющую экономические, социальные, экологические и инфраструктурные компоненты. Его можно рассматривать как живой организм, где каждый элемент взаимодействует с другими, формируя устойчивую, но изменчивую структуру. Управление такой системой требует комплексного подхода, учитывающего не только внутренние процессы, но и внешние факторы влияния, такие как государственная политика, миграционные потоки, глобальные экономические тенденции и климатические изменения. Городская территория – это не просто место концентрации зданий и дорог, а сложный пространственный организм, обладающий уникальными характеристиками.

Рельеф местности (равнинный, холмистый, прибрежный) определяет планировочную структуру, влияя на транспортные маршруты, распределение жилых и промышленных зон. Ландшафтные особенности также играют ключевую роль в создании городской среды. Наличие водных объектов (рек, озер, побережий) или лесных массивов не только влияет на микроклимат, но и формирует рекреационные зоны, повышающие качество жизни горожан.

Исследования урбанистов показывают, что доступность зеленых насаждений снижает уровень стресса у жителей на 15–20%, что подтверждает важность экологического планирования [9].

### *Комплексный анализ как основа градостроительных решений*

В Российской Федерации градостроительная политика реализуется через разработку генеральных планов – ключевых документов территориального планирования, определяющих стратегию пространственного развития населенных пунктов на долгосрочную перспективу (15-20 лет). Эти документы представляют собой не просто схемы размещения объектов, а сложные аналитические продукты, формируемые на основе всестороннего изучения планировочных условий. Современная практика градостроительства рассматривает генеральный план как динамичный инструмент управления, требующий регулярной актуализации в соответствии с меняющимися социально-экономическими условиями.

Процесс разработки генерального плана начинается с проведения масштабного предпроектного исследования, включающего:

- Анализ демографических тенденций и прогнозирование численности населения;
- Оценку существующей инженерной и транспортной инфраструктуры;
- Исследование экологического состояния территории;
- Изучение историко-культурного наследия;
- Анализ экономического потенциала и инвестиционной активности [10].

Функциональное зонирование представляет собой научно обоснованное распределение городского пространства на участки с различным целевым назначением. Этот подход позволяет эффективно организовать жизнь города, обеспечивая комфортную среду для жителей, рациональное использование ресурсов и устойчивое развитие. В современной градостроительной практике выделяют несколько основных типов зон, каждая из которых выполняет свою роль в структуре населенного пункта.

*Жилые зоны* занимают до 60% городской территории и включают в себя территории многоэтажной и малоэтажной застройки, а также объекты социальной инфраструктуры – школы, детские сады, поликлиники и магазины. Их планировка направлена на создание комфортных условий для проживания, с учетом транспортной доступности и необходимого уровня благоустройства.

*Производственные зоны* составляют 15-25% городской площади и охватывают промышленные предприятия, коммунально-складские комплексы и логистические центры. Их размещение учитывает требования экологической безопасности, минимизацию негативного воздействия на жилую застройку и транспортную инфраструктуру.

*Общественно-деловые зоны (10-15%)* сосредотачивают административные учреждения, образовательные и культурные объекты, офисные и торговые центры. Эти территории формируют деловую и социальную активность города, обеспечивая пространство для работы, обучения и общественных мероприятий.

*Рекреационные зоны* включают парки, скверы, набережные и водные объекты, формируя экологический каркас города. Они играют ключевую роль в поддержании качества окружающей среды, обеспечивая места для отдыха, занятий спортом и сохранения биоразнообразия [11].

#### *Принципы градорегулирования в современной практике*

Система территориального планирования в России базируется на четырех фундаментальных принципах, обеспечивающих баланс между различными аспектами городского развития.

*Принцип комплексности* реализуется через строгую систему градостроительного нормирования. Согласно Градостроительному кодексу РФ, для каждой территориальной зоны устанавливаются:

- Виды разрешенного использования земельных участков;
- Предельные параметры строительства (этажность, плотность застройки, коэффициент землепользования);

- Требования к сохранению объектов культурного наследия;
- Экологические ограничения и нормативы.

*Принцип планирования* развития территории предусматривает:

- Резервирование земель для объектов федерального и регионального значения;
  - Создание "зон развития" с особыми условиями градостроительной деятельности;
  - Формирование земельных банков для будущего строительства
- Важным аспектом является учет демографических прогнозов – современные методики позволяют с точностью до 85% предсказывать потребности в жилье и инфраструктуре на 10-летний период.

*Принцип установления регламентов* базируется на анализе сложившейся планировочной структуры, включая:

- Исторически сформировавшуюся сеть улиц и дорог;
- Сложившиеся центры деловой и общественной активности.

Существующую систему инженерных коммуникаций

Особое внимание уделяется сохранению "духа места" (*genius loci*) – уникального сочетания архитектурных, исторических и ландшафтных характеристик территории [12].

Современные исследования убедительно демонстрируют прямую зависимость между состоянием окружающей среды и ключевыми демографическими показателями. По данным Всемирной организации здравоохранения, до 25% всех заболеваний в урбанизированных территориях непосредственно связаны с экологическими факторами. В Российской Федерации правовые основы охраны окружающей среды закреплены в Федеральном законе от 10.01.2002 №7-ФЗ, который устанавливает комплексный подход к регулированию антропогенного воздействия на природные системы.

### *Комплексная оценка экологической ситуации в городских поселениях*

Оценка экологического благополучия городских территорий требует всестороннего изучения взаимосвязанных факторов, формирующих качество окружающей среды. В рамках экономико-производственного анализа особое внимание уделяется структуре промышленного потенциала, где ключевое значение имеет доля предприятий, относящихся к категории значимых загрязнителей. Эти объекты требуют особого контроля за их ресурсопотреблением, включая объемы водозабора и энергопотребления, которые напрямую связаны с уровнем воздействия на окружающую среду. Не менее важным аспектом является учет объемов образующихся отходов производства с обязательной классификацией по степени опасности, что позволяет разрабатывать адресные мероприятия по их утилизации и переработке.

Демографические параметры представляют собой важную составляющую экологического анализа, поскольку плотность и распределение населения непосредственно влияют на антропогенную нагрузку. Изучение миграционных потоков и динамики численности жителей помогает прогнозировать изменение экологической ситуации, в то время как возрастная структура населения определяет особенности потребления ресурсов и образования бытовых отходов. Эти данные особенно важны для планирования инфраструктуры и расчета допустимой антропогенной нагрузки на городские экосистемы [13].

Градостроительные особенности играют ключевую роль в формировании экологического каркаса города. Баланс между застроенными территориями и рекреационными зонами определяет способность городской среды к саморегуляции. Наличие и состояние санитарно-защитных зон вокруг промышленных объектов требует постоянного мониторинга, так как эти территории выполняют важную буферную функцию. Система озеленения, включающая парки, скверы и защитные лесополосы, оценивается с точки

зрения ее эффективности в снижении уровня загрязнения и создании комфортной среды для жителей.

Экологические показатели служат основой для объективной оценки состояния городской среды. Индекс загрязнения атмосферы позволяет комплексно оценить качество воздуха, учитывая концентрации основных загрязняющих веществ. Состояние водных объектов анализируется с помощью специальных индексов, отражающих степень их загрязнения химическими и биологическими веществами. Качество почвенного покрова оценивается по содержанию тяжелых металлов и других стойких загрязнителей, способных накапливаться в экосистемах. Регулярный мониторинг этих показателей позволяет своевременно выявлять негативные тенденции и принимать управленческие решения, направленные на улучшение экологической ситуации.

Такой многофакторный подход обеспечивает комплексное понимание экологического состояния городских территорий и создает научную основу для разработки эффективных природоохранных мероприятий. Взаимосвязь всех рассматриваемых аспектов подчеркивает необходимость системного управления городской средой, где экологические приоритеты согласуются с социально-экономическим развитием территории [14].

Зависимость концентраций атмосферных загрязнений от *направления и скорости ветра*. В городских условиях направление ветра становится критически важным фактором, определяющим пространственное распределение загрязняющих веществ. Как показывают многолетние наблюдения Росгидромета, при расположении жилых кварталов с подветренной стороны от промышленных предприятий концентрации вредных веществ могут превышать среднесуточные показатели в 3-5 раз.

Особенно ярко эта зависимость проявляется при анализе выбросов диоксида серы - маркера промышленного загрязнения. В городах с четкой локализацией промышленных зон карта загрязнения воздуха практически

повторяет розу ветров с максимальными концентрациями в секторах, куда направлены преобладающие ветры от предприятий.

*Скорость ветра* является ключевым фактором, определяющим особенности рассеивания и накопления загрязняющих веществ в городской атмосфере. При слабых ветровых потоках, не превышающих 1 м/с, создаются условия для аккумуляции вредных веществ в приземном слое воздуха. Такая ситуация характерна для антициклональной погоды, когда отсутствие интенсивного воздухообмена приводит к формированию температурных инверсий. Эти метеорологические условия способствуют увеличению времени пребывания загрязняющих веществ в воздушной среде, что существенно повышает риски для здоровья населения, особенно в районах с высокой концентрацией промышленных предприятий и транспортных магистралей.

При умеренных ветрах, скорость которых колеблется в пределах 2-4 м/с, наблюдается наиболее благоприятный режим для рассеивания выбросов. Такие воздушные потоки обеспечивают равномерное распределение загрязняющих веществ в атмосфере, формируя устойчивые факелы выбросов от стационарных источников. В этих условиях происходит эффективное снижение локальных концентраций вредных веществ, хотя при определенных особенностях рельефа и городской застройки могут сохраняться зоны повышенного загрязнения. Данный ветровой режим считается оптимальным с точки зрения минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

Сильные ветровые потоки, превышающие 6 м/с, вызывают интенсивный турбулентный перенос загрязняющих веществ. В таких условиях происходит быстрое перемешивание воздушных масс, что приводит к значительному увеличению зоны влияния промышленных выбросов. Одновременно сильные ветры могут провоцировать вторичное пыление с открытых территорий, строительных площадок и промышленных зон, что существенно изменяет качественный состав атмосферных загрязнений. Особую опасность представляют случаи, когда сильные ветры сочетаются с засушливыми условиями, что приводит к масштабному переносу пылевых частиц на

значительные расстояния. Следует отметить, что воздействие ветра на процессы распространения загрязнений существенно варьируется в зависимости от времени года, времени суток и особенностей городской застройки. В условиях плотной многоэтажной застройки даже умеренные ветровые потоки могут создавать сложные схемы циркуляции воздуха, приводящие к образованию локальных зон накопления загрязнений [15].

Методика ОНД-86 устанавливает важную закономерность - для каждого промышленного источника существует определенный диапазон "опасных" скоростей ветра (как правило, 4-6 м/с), при которых наблюдается максимальная приземная концентрация загрязняющих веществ. Это явление объясняется сложным взаимодействием нескольких физических процессов [16].

Высота подъема факела выбросов при таких скоростях ветра оказывается недостаточной для эффективного рассеивания, но при этом турбулентное перемешивание еще не достигает интенсивности, необходимой для быстрого разбавления загрязнений. Одновременно скорость химических превращений вредных веществ в атмосфере может не успевать за процессами их переноса, что приводит к накоплению опасных соединений в приземном слое.

Особую сложность представляет учет городской аэродинамики, которая кардинально меняет характер распространения выбросов. Плотная многоэтажная застройка формирует специфические зоны застоя воздуха, где концентрации загрязняющих веществ могут достигать критических значений. Наиболее проблемными участками становятся внутренние пространства крупных кварталов, подветренные стороны высотных зданий и узкие улицы-каньоны, где создаются условия для длительного накопления вредных веществ. В таких зонах даже при относительно сильном фоновом ветре может наблюдаться практически полное отсутствие воздухообмена. Городская среда генерирует и сложные локальные циркуляции воздушных масс. Термические потоки, возникающие над "островами тепла" - участками с повышенной температурой поверхности - создают вертикальные движения воздуха,

которые могут как способствовать рассеиванию загрязнений, так и формировать замкнутые циркуляционные ячейки. Вихревые образования у зданий сложной архитектурной формы приводят к непредсказуемому перераспределению выбросов, а каналные эффекты вдоль транспортных магистралей способствуют дальнему переносу загрязнений в определенных направлениях.

Эти особенности приводят к тому, что реальное распределение загрязнений часто отличается от расчетного, выполненного по стандартным моделям. Как показывают исследования МГУ, в условиях плотной застройки:

- Фактическая зона влияния выбросов может увеличиваться на 30-40%;
- Концентрации в "аэродинамической тени" зданий сохраняются дольше;
- Вертикальное перемешивание существенно ослабляется;
- Влияние температуры и туманов на величину загрязнения атмосферы.

*Температура воздуха* является одним из ключевых факторов, определяющих уровень загрязнения атмосферы в городских условиях. Однако ее влияние носит сложный и неоднозначный характер, что связано с взаимодействием множества сопутствующих факторов. Рассмотрим этот вопрос более детально.

В зимний период при установлении аномально низких температур наблюдается резкое ухудшение качества воздуха. Это объясняется несколькими взаимосвязанными процессами. Во-первых, при температурах ниже  $-20^{\circ}\text{C}$  значительно увеличивается объем сжигаемого топлива для отопления жилых и промышленных зданий. В сибирских городах, таких как Новосибирск или Красноярск, в такие периоды фиксируется рост концентрации угарного газа в 3-5 раз по сравнению с нормальными температурными условиями. Во-вторых, холодный воздух обладает большей

плотностью, что способствует накоплению загрязняющих веществ в приземном слое. В-третьих, антициклональная погода, часто сопровождающая сильные морозы, приводит к формированию устойчивых температурных инверсий, которые действуют как "крышка", препятствуя рассеиванию выбросов [17].

Особенно опасной становится ситуация при сочетании низких температур со слабыми ветрами. В таких условиях в городах с развитой промышленностью, например в Магнитогорске или Череповце, концентрации бенз(а)пирена могут достигать 20-30 ПДК. При этом следует учитывать, что эффективность работы многих систем очистки на промышленных предприятиях существенно снижается при экстремально низких температурах. В летний период механизмы влияния температуры на загрязнение воздуха принципиально иные. При температурах выше +25°C активизируются фотохимические процессы, приводящие к образованию вторичных загрязнителей.

Также увеличивается испарение летучих органических соединений с поверхности дорожных покрытий и промышленных объектов. В крупных мегаполисах, таких как Санкт-Петербург наблюдается значительный рост концентраций формальдегида [18]. Важным аспектом является взаимодействие температуры с городским микроклиматом.

Эффект "теплового острова", когда температура в центре города на 5-7°C выше, чем в пригородах, создает дополнительные конвекционные потоки. Эти потоки могут как способствовать рассеиванию загрязнений, так и, наоборот, приводить к их накоплению в определенных зонах в зависимости от особенностей городской застройки и расположения промышленных предприятий. Особого внимания заслуживает влияние температуры на образование и свойства туманов. В условиях тумана происходят сложные физико-химические превращения загрязняющих веществ. Капли тумана служат центрами конденсации для аэрозолей, а также способствуют переходу газообразных загрязнений в жидкую фазу. При этом могут образовываться

высокотоксичные соединения, такие как сернистая и азотная кислоты. В промышленных городах Урала и Сибири в холодный период года часто наблюдаются так называемые "морозные туманы", при которых концентрации диоксида серы могут увеличиваться в несколько раз по сравнению с периодами без тумана.

Следует отметить, что температурный фактор нельзя рассматривать изолированно от других метеорологических параметров. Например, при одной и той же температуре уровень загрязнения может существенно различаться в зависимости от скорости ветра, влажности воздуха и атмосферного давления. Поэтому современные системы мониторинга и прогнозирования качества воздуха должны учитывать комплексное взаимодействие всех этих факторов.

Для эффективного управления качеством атмосферного воздуха в городах необходимо разрабатывать дифференцированные подходы, учитывающие температурные особенности каждого сезона. Это включает:

- адаптацию режимов работы промышленных предприятий к температурным условиям;
- оптимизацию работы систем отопления в зимний период;
- разработку специальных мероприятий по защите населения в периоды экстремальных температур;
- совершенствование систем мониторинга с учетом температурных эффектов;
- Влияние осадков на загрязнение атмосферы.

*Атмосферные осадки* представляют собой важнейший природный механизм очищения воздуха от различных загрязняющих веществ в городских условиях. Однако эффективность этого процесса зависит от множества взаимосвязанных факторов, что делает его изучение особенно сложным и многогранным. Рассмотрим подробнее особенности этого явления. Основным механизмом очищения воздуха является процесс вымывания загрязняющих веществ осадками. Этот процесс осуществляется через несколько физических

механизмов, эффективность которых существенно различается. Наибольшей эффективностью обладает вымывание крупных аэрозольных частиц размером более 1 микрона - для них коэффициент вымывания может достигать 100%. Это объясняется тем, что такие частицы эффективно захватываются падающими каплями дождя или снежинками благодаря инерционному механизму осаждения.

Частицы среднего размера (от 0,1 до 1 микрона) удаляются значительно хуже, с эффективностью около 30-50%, так как для них менее эффективны как броуновская диффузия, так и инерционный захват. Важно, что ультрадисперсные частицы размером менее 0,1 микрона снова начинают хорошо вымываться из атмосферы благодаря интенсивной броуновской диффузии, обеспечивающей их контакт с каплями осадков. Эффективность вымывания существенно зависит от типа и характеристик самих осадков [19].

Наблюдения показывают, что мелкий морозящий дождь с каплями небольшого размера оказывается более эффективным для очистки атмосферы, чем интенсивный ливень с крупными каплями. Это кажущееся противоречие объясняется тем, что хотя крупные капли обладают большей массой, они имеют меньшую относительную поверхность и быстрее падают, сокращая время контакта с загрязненным воздухом. Для морозящего дождя с интенсивностью около 1 мм/час характерно удаление до 28% аэрозольных частиц размером 10 микрон всего за 15 минут выпадения. При этом для полного очищения атмосферы от мелкодисперсных частиц таким дождем может потребоваться до 2 часов непрерывного выпадения осадков.

Особого внимания заслуживает вымывающая способность снега, которая в 10-50 раз превышает аналогичный показатель для дождя. Такая существенная разница объясняется несколькими факторами. Во-первых, снежинки имеют сложную разветвленную структуру, что обеспечивает им значительно большую удельную поверхность по сравнению с каплями дождя. Во-вторых, скорость падения снежинок существенно ниже, что увеличивает время их контакта с загрязненным воздухом. В-третьих, процесс

формирования снежинок в облаках сам по себе способствует захвату аэрозольных частиц, которые служат ядрами кристаллизации. Наблюдения в различных городах России показывают, что после сильного снегопада концентрация аэрозолей в приземном слое атмосферы может снижаться на 70-80% всего за 1-2 часа. Что касается газообразных загрязнений, то их вымывание происходит значительно менее эффективно.

Наибольшей растворимостью в воде обладает диоксид серы, на вымывание которого приходится около 11% общего стока этого вещества из атмосферы. Оксиды азота удаляются осадками значительно хуже из-за их меньшей химической активности и растворимости. Практически не вымывается угарный газ, что связано с его крайне низкой растворимостью в воде. Важно отметить, что процесс вымывания загрязнений осадками может иметь и негативные последствия.

Наиболее серьезным из них является образование кислотных дождей, когда вымываемые из атмосферы диоксид серы и оксиды азота превращаются в серную и азотную кислоты. Другим негативным эффектом является вымывание радиоактивных веществ из атмосферы, что приводит к формированию локальных пятен загрязнения на земной поверхности. Кроме того, при взаимодействии осадков с промышленными выбросами могут образовываться токсичные комплексы тяжелых металлов, представляющие серьезную опасность для экосистем [20].

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Методы анализа и обработки информации

В рамках исследования проведен анализ концентрации диоксида азота в атмосфере Санкт-Петербурга за летний период 2022 года. Выбор диоксида азота в качестве основного объекта изучения обусловлен его высокой частотой регистрации станцией мониторинга, что обеспечило достаточный объем данных для статистического анализа. Динамичный характер концентрации этого вещества, связанный с транспортной нагрузкой и метеорологическими факторами, делает его релевантным для изучения пространственно-временных закономерностей загрязнения воздуха.

#### *Источники данных и их подготовка*

В работе проанализированы результаты наблюдений на 23 постах в период 01.06.2022 по 31.08.2022 года. Наблюдения велись ежедневно, однако на некоторых станциях возникали перерывы в работе разной продолжительности. Эти пропуски в данных были вызваны техническими неполадками и особенностями организации измерений. Чтобы обеспечить достоверность результатов, пришлось тщательно проверять исходную информацию и отбирать для анализа только надежные данные. После обработки остался массив сведений, позволяющий объективно оценить уровень загрязнения воздуха в разных районах города. Такая подготовка данных стала важным этапом исследования, без которого невозможно было бы перейти к анализу пространственного распределения загрязняющих веществ и выявлению их источников.

Данные о концентрации диоксида азота получены с официального экологического портала Санкт-Петербурга. Информация на портале представлена в формате, не адаптированном для автоматического экспорта (HTML-таблицы без структурированных метаданных). Для обеспечения качества анализируемой информации был проведен комплекс процедур

предварительной обработки данных. Исходные данные вручную переносились в таблицы Excel, где осуществлялась их систематизация и очистка. Первоначальный этап включал удаление дублирующихся строк и записей с пустыми значениями, что позволило исключить возможные искажения в последующем анализе.

Важным шагом стало исключение неинформативных столбцов, содержащих технические параметры станций мониторинга, не имеющие непосредственного отношения к исследуемым показателям. Это позволило сосредоточиться на анализе ключевых параметров и повысить эффективность обработки данных. Особое внимание было уделено выявлению и устранению аномальных значений концентраций загрязняющих веществ. Для этого проводился визуальный анализ временных графиков, что дало возможность идентифицировать и исключить резко выделяющиеся показатели, вероятно связанные с ошибками измерений или кратковременными техногенными воздействиями. Метеорологические данные, включающие показатели направления и скорости ветра, были получены с портала RP5.ru [21], который предоставляет достоверные исторические наблюдения с учетом специфики климатических условий Северо-Западного региона России. Информация о направлении ветра, первоначально представленная в румбовой системе (например, "СВ" для северо-восточного направления), была преобразована в градусную меру (диапазон 0-360°). Данная процедура выполнялась вручную с применением стандартной таблицы соответствия между румбами и угловыми градусными значениями, что гарантировало точность преобразования и последующей интерпретации результатов.

#### *Расчет ключевых показателей*

##### *Суточный прирост концентрации диоксида азота*

Для количественной оценки изменчивости концентраций загрязняющих веществ был применен метод расчета абсолютного суточного прироста. По каждому пункту мониторинга определялась разница показателей между

соседними днями наблюдений с использованием следующего расчетного алгоритма:

$$\Delta C = |C_{\text{текущий}} - C_{\text{предыдущий}}|,$$

где  $C$  — значение концентрации. Применение модуля разницы обеспечило объективную оценку интенсивности изменений концентрационного фона независимо от направления колебаний (увеличение или уменьшение показателей). Такой подход позволил:

- Количественно характеризовать устойчивость загрязнения атмосферы;
- Выявлять периоды резких изменений экологической обстановки;
- Оценивать динамику загрязнения в течение всего летнего сезона;
- Сравнивать изменчивость показателей между различными станциями мониторинга.

Полученные значения суточных приростов составили основу для анализа временной изменчивости загрязнения, позволив выявить характерные периоды стабилизации и резких колебаний концентрационного фона. Особое внимание уделялось случаям значительных суточных изменений, которые могли свидетельствовать о нестационарных процессах в атмосфере или изменении интенсивности источников выбросов.

#### *Плотность застройки*

Для комплексной оценки воздействия городской инфраструктуры на распределение диоксида азота была разработана специальная методика определения плотности застройки. Исследование проводилось для каждой станции мониторинга в радиусе 100 метров, что соответствует оптимальному масштабу для анализа локальных эффектов городской среды.

Процедура исследования включала несколько последовательных этапов:

Картографический анализ с использованием спутниковых снимков из сервиса Яндекс.Карты [22], обеспечивающих высокое пространственное разрешение. На основе этих данных проводилось:

- Точное определение границ исследуемой территории;
- Выделение контуров всех капитальных строений;
- Измерение площади застроенной территории.

Расчет показателя плотности застройки по формуле:

$$\text{Плотность} = \frac{\text{Площадь застройки}}{\text{Общая площадь участка (100 \times 100 м)}} \times 100\%$$

Расчет проводился следующим образом:

- Суммировалась площадь всех зданий в пределах анализируемой зоны;
- Полученное значение делилось на общую площадь площадки;
- Результат умножался на 100 для перевода в проценты.

Полученные значения плотности застройки были систематизированы и сопоставлены с данными о концентрациях диоксида азота, что позволило:

- Выявить корреляцию между степенью урбанизации и уровнем загрязнения;
- Определить критические значения плотности застройки;
- Установить особенности распределения загрязнителей в различных городских условиях.

Данная методика обеспечила объективную количественную оценку одного из ключевых факторов, влияющих на качество городского воздуха, и позволила учесть особенности микрорайонирования при анализе экологической обстановки.

#### *Высота застройки*

В процессе проведения градостроительного анализа ключевое значение приобретает точное определение высотных параметров зданий. В рамках данного исследования был применен широко используемый в урбанистике метод расчета высоты сооружений на основе данных об их этажности. Этот подход, несмотря на свою кажущуюся простоту, позволяет получать

достаточно точные результаты, что подтверждается многочисленными практическими применениями в различных градостроительных проектах.

Основой для расчетов послужило стандартное значение высоты одного этажа, равное трем метрам, что соответствует общепринятым строительным нормам и правилам для большинства типов зданий. При проведении расчетов учитывались различные архитектурные особенности, которые могут существенно влиять на общую высоту сооружения. В частности, цокольные этажи, используемые под парковки или технические помещения, принимались в расчет как половина полноценного этажа, что добавляло к общей высоте здания 1,5 метра. Этот подход основан на анализе реальных строительных проектов, где высота таких помещений обычно несколько меньше, чем у основных этажей.

Аналогичным образом учитывались и мансардные этажи, а также различные технические надстройки, которые добавляли к общей высоте здания полные 3 метра, так как их габариты в большинстве случаев соответствуют стандартной высоте этажа. Сбор исходных данных об этажности зданий осуществлялся с использованием нескольких независимых источников информации. Основными из них стали популярные картографические сервисы, такие как 2ГИС [23] и Яндекс.Карты, которые предоставляют достаточно точные сведения о количестве этажей в зданиях. Дополнительным источником информации послужил визуальный анализ спутниковых снимков высокого разрешения, который особенно важен при работе с новостройками, информация о которых еще не успела попасть в общедоступные базы данных.

Для обеспечения максимальной точности полученных результатов применялся метод перекрестной проверки данных из разных источников, а в случаях возникновения спорных ситуаций проводился дополнительный анализ с использованием панорамных изображений улиц. Важным преимуществом использованного метода является его экономическая эффективность и высокая скорость обработки данных. В отличие от более

точных, но и более дорогостоящих методов, таких как лазерное сканирование или аэрофотосъемка с использованием беспилотных летательных аппаратов, расчет высоты по этажности позволяет в короткие сроки обрабатывать значительные массивы данных о городской застройке. При этом, как показывает практика, погрешность таких расчетов редко превышает 5-7%, что является вполне приемлемым показателем для большинства видов градостроительных исследований. Особенно важно это при работе с крупными городскими территориями, где проведение детальных измерений для каждого здания потребовало бы неоправданно больших временных и финансовых затрат. Таким образом, примененный в исследовании метод расчета высоты зданий по данным об их этажности доказал свою эффективность и практическую ценность.

#### *Анализ корреляционных зависимостей*

В ходе исследования была проанализирована взаимосвязь между направлением воздушных потоков и уровнем загрязнения атмосферы диоксидом азота. Для систематизации данных о ветре использовалась классификация по восьмирумбовой системе, где каждый сектор охватывает 45 градусов (0-45° - северный, 45-90° - северо-восточный и т.д.). Такой подход позволяет наглядно представить пространственное распределение загрязнителей относительно основных направлений ветра. Для каждого из восьми направлений была вычислена среднеарифметическая концентрация диоксида азота, что дало возможность количественно оценить вариабельность содержания этого опасного вещества в зависимости от воздушных потоков. Полученные результаты были визуализированы с помощью круговой диаграммы, где длина каждого сектора пропорциональна соответствующему значению концентрации загрязнителя. Такой метод представления данных наглядно демонстрирует:

- преимущественные направления переноса вредных веществ;
- сектора с максимальным и минимальным уровнем загрязнения;

- возможное расположение источников выбросов относительно точки мониторинга.

Проведенный анализ имеет важное практическое значение для экологического мониторинга, так как позволяет идентифицировать основные направления распространения загрязнения и потенциальные источники выбросов. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации расположения стационарных постов наблюдения за качеством воздуха и разработки мероприятий по снижению антропогенной нагрузки на атмосферу. Особую ценность такие исследования представляют для промышленных районов и крупных городов, где проблема загрязнения воздуха диоксидом азота стоит особенно остро.

## **2.2 Характеристика расположения точек наблюдения**

Создание автоматизированной системы мониторинга атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге представляет собой важнейший элемент экологической инфраструктуры мегаполиса, направленный на обеспечение комплексного контроля за состоянием воздушного бассейна. Разработка и внедрение данной системы были обусловлены необходимостью предоставления достоверной и оперативной информации о качестве атмосферного воздуха широкому кругу заинтересованных сторон, включая органы государственной власти различного уровня, муниципальные учреждения, промышленные предприятия, научные организации и население города.

С технической точки зрения система представляет собой сложный инженерно-технический комплекс, интегрирующий современные средства автоматизированного контроля, телекоммуникационные технологии и специализированное программное обеспечение. Такой подход позволяет осуществлять непрерывный мониторинг ключевых показателей качества атмосферного воздуха в режиме реального времени, что соответствует требованиям государственной системы экологического мониторинга.

На сегодняшний день мониторинговая сеть Санкт-Петербурга включает:

- 25 автоматических станций контроля, оснащенных высокоточным аналитическим оборудованием;
- 9 стационарных постов наблюдения, выполняющих расширенный перечень измерений;
- мобильные лабораторные комплексы, обеспечивающие оперативный контроль в различных точках городской территории.

Особенностью функционирования автоматических станций является их равномерное распределение по всем 18 административным районам города, что позволяет получать репрезентативные данные о состоянии атмосферного воздуха на всей территории мегаполиса. Важным преимуществом системы является высокая частота измерений - отбор проб и анализ воздуха проводятся каждые 20 минут, что обеспечивает:

- оперативное выявление превышений предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ;
- возможность отслеживания динамики изменения экологической ситуации;
- своевременное принятие управленческих решений.

Современные технологии обработки данных позволяют не только фиксировать текущее состояние атмосферного воздуха, но и проводить:

- статистический анализ многолетних наблюдений;
- моделирование распространения загрязняющих веществ;
- прогнозирование экологической обстановки.

Интеграция данной системы с другими элементами экологического мониторинга создает единое сообщающееся информационное пространство, способствующее эффективному управлению качеством окружающей среды в условиях крупного промышленного центра или городской агломерации. Реализация такого комплексного подхода соответствует принципам устойчивого развития крупных городов и способствует созданию

благоприятных условий, безопасности и комфорта для жизни населения мегаполиса [21].

*Адреса расположения автоматических станций (рисунок 2):*

№1 - ул. Профессора Попова, д.48;

№2 - г. Колпино, Красная ул., д.1А;

№3 - ул. Карбышева, д.7;

№4 - Малоохтинский пр., д.98;

№5 - пр. Маршала Жукова, д.30, корп.3;

№ 6 – пр. КИМа, 26 лит. А;

№ 7 - ул. Шпалерная, д. 56;

№ 8 - ул. Новосельковская, 23;

№ 9 - Малая Балканская ул., д. 54;

№ 10 - Московский пр., д. 19;

№ 11 - г. Сестрорецк, ул. М. Горького, д. 2;

№ 12 - ул. Пестеля, д.1;

№ 13 – Индустриальный пр., д.64;

№ 14 – Уткин пр., д 16;

№ 15 - Кронштадт, ул. Ильмянинова, д.4;

№ 16 - ул. Севастьянова, д.11;

№ 17 - г. Пушкин, Тиньков пер., д.4;

№ 18 - ул. Ольги Форш, д.6;

№ 19- пр. Ветеранов, дом 167, к. 6/1;

№ 20 - ул. Тельмана, д.24;

№ 21 – г. Ломоносов, ул. Федюнинского, 3;

№22 – Канонерский остров, 21, стр. 1;

№23 – пр. Динамо, 44;

№24 – В.О. Средний пр.,74;

№25 – пос. Металлострой, Железнодорожная ул., 13.



Рисунок 2 - Схема размещения автоматических станций

Сеть станций мониторинга загрязнения атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге охватывает ключевые зоны с различными типами антропогенной нагрузки, включая промышленные районы, транспортные магистрали, жилую застройку и пригородные территории. Представленные ниже характеристики станций отражают их функциональное назначение, особенности окружающей среды и приоритетные загрязнители, подлежащие контролю. Анализ данных, полученных с этих станций, позволяет оценивать пространственно-временную динамику качества атмосферного воздуха, выявлять зоны экологического риска и разрабатывать меры по снижению негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения.

*ул. Профессора Попова, 48* – Расположена в зоне смешанной застройки (академические учреждения и жилые массивы), что обуславливает необходимость контроля антропогенных выбросов, включая автотранспортные и локальные промышленные источники.

*г. Колпино, Красная ул., 1а* – Находится в непосредственной близости от промышленного кластера (Ижорский завод), что требует мониторинга выбросов тяжелых металлов, взвешенных частиц и газообразных загрязнителей.

*ул. Карбышева, 7* – Размещена в жилом районе (Калининский) с высокой транспортной нагрузкой, что определяет приоритетный контроль за уровнем загрязняющих веществ.

*пр. Маршала Жукова, 30/3* – Расположена вдоль магистральной трассы, что обеспечивает репрезентативность данных по транспортным эмиссиям, включая ультрадисперсные частицы.

*пр. КИМа, 26 лит. А* – Характеризуется влиянием портовой инфраструктуры и промышленных объектов, что требует мониторинга выбросов сажи и летучих органических соединений.

*Шпалерная ул., 56* – Фоновая станция в центральной части города, предназначенная для оценки общего уровня загрязнения атмосферы в условиях плотной застройки.

*ул. Новосельковская, 23* – Размещена в жилом массиве (Выборгский район) с целью контроля воздействия автотранспорта и локальных источников теплоснабжения.

*Малая Балканская ул., 54* – Расположена в зоне высокой плотности населения (Фрунзенский район), что обуславливает необходимость мониторинга вторичных загрязнителей.

*Московский пр., 19* – Ключевая точка на одной из основных транспортных артерий города, обеспечивающая данные по динамике выбросов от автотранспорта.

*ул. Пестеля, 1* – Фоновая станция в историческом центре, предназначенная для оценки влияния туристического потока и ограниченного транспортного движения.

*Индустриальный пр., 64* – Находится в зоне промышленной застройки (Красногвардейский район), что требует контроля за выбросами металлургических и химических производств.

*Уткин пр., 16* – Расположена вблизи железнодорожной инфраструктуры, что обуславливает мониторинг выбросов дизельного транспорта и промышленных объектов.

*Кронштадт, ул. Ильмянинова, 4* – Ориентирована на оценку влияния судоходства, включая эмиссии диоксида азота от морских судов.

*ул. Севастьянова, 11* – Находится в районе с комбинированным воздействием промышленных и транспортных источников загрязнения.

*г. Пушкин, Тиньков пер., 4* – Контролирует уровень загрязнения в пригородной зоне, включая выбросы от локальных котельных и автотранспорта.

*ул. Ольги Форш, 6* – Размещена в жилом районе (Московский) для оценки влияния коммунально-бытовых источников загрязнения.

*пр. Ветеранов, 167, к. 6/1* – Расположена вдоль оживлённой магистрали, что обеспечивает мониторинг транспортных выбросов в южной части города.

*ул. Тельмана, 24* – Находится в промзоне (Невский район), что требует контроля за выбросами химической и обрабатывающей промышленности.

*г. Ломоносов, ул. Федюнинского, 3* – Ориентирована на мониторинг влияния портовой деятельности и пригородной застройки.

*Канонерский остров, 21, стр. 1* – Расположена в зоне судостроительных предприятий, что обуславливает контроль за выбросами ЛОС и тяжелых металлов.

*пр. Динамо, 44* – Фоновая станция в парковой зоне, предназначенная для оценки фонового уровня загрязнения.

*В.О. Средний пр., 74* – Размещена в жилом районе Васильевского острова с целью контроля автотранспортного воздействия.

*пос. Металлострой, Железнодорожная ул., 13* – Находится в зоне металлургического производства, что требует мониторинга выбросов металлической пыли и оксидов серы.

Каждая станция обеспечивает репрезентативные данные в соответствии с особенностями локализации, что позволяет проводить комплексный анализ экологической ситуации в Санкт-Петербурге и его окрестностях.

### 3. АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

#### 3.1 Пространственное распределение загрязняющих веществ

Существующая обширная сеть точек мониторинга качества воздуха в Санкт-Петербурге (рисунок 3) позволяет получить достаточный для пространственного анализа массив данных. В качестве модельного вещества в нашем исследовании диоксид азота, так как загрязнитель образуется преимущественно в результате работы автомобильных двигателей и промышленных предприятий, что позволяет четко проследить связь между его концентрациями и антропогенной деятельностью.

Особенность диоксида азота заключается в его способности сохраняться в атмосфере достаточно долго для пространственного анализа, но при этом не настолько долго, чтобы равномерно распределяться по всей территории города. Это создает характерную картину "пятнистого" распределения с четко выраженными очагами загрязнения вблизи автодорог и промышленных зон.

Кроме того, мониторинг диоксида азота хорошо организован в Санкт-Петербурге, что обеспечивает надежную основу для анализа. Его повышенные концентрации не только свидетельствуют о проблемах качества воздуха, но и напрямую связаны с рисками для здоровья населения, что подчеркивает практическую значимость исследования. Способность этого газа к химическим превращениям в атмосфере также делает его важным маркером для оценки фотохимического загрязнения городской среды. Все эти факторы в совокупности делают диоксид азота наиболее показательным веществом для изучения пространственного распределения загрязнений в условиях мегаполиса.

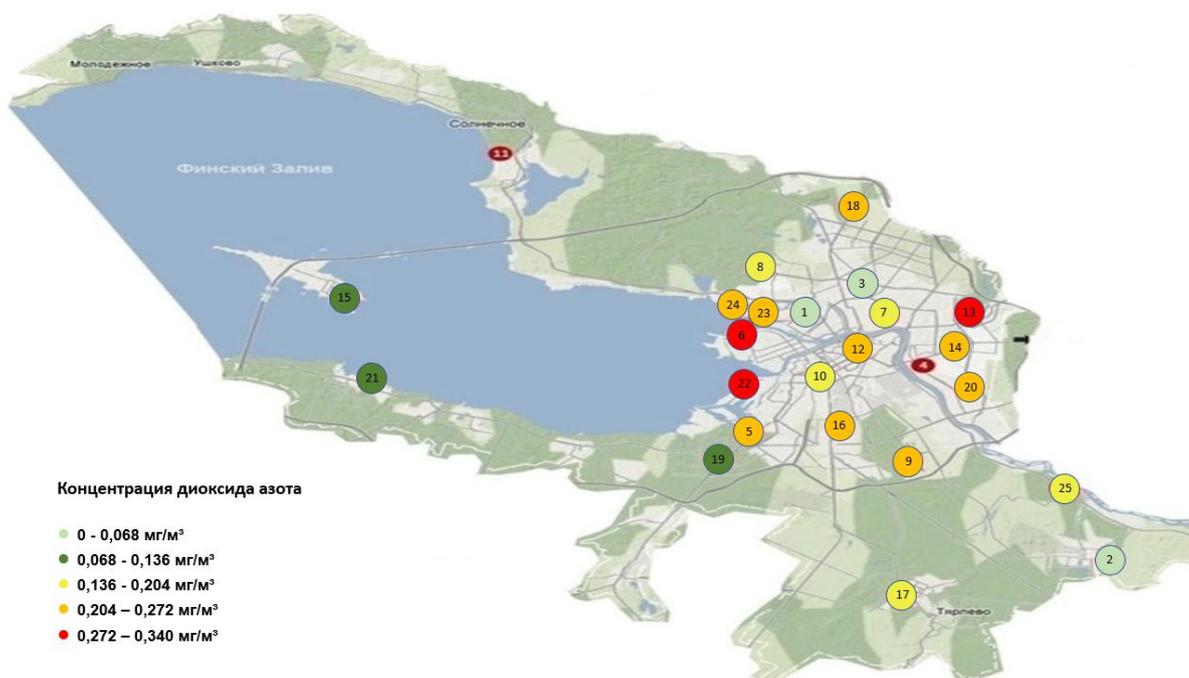


Рисунок 3 - Распределение концентраций диоксида азота.

Наиболее высокие показатели концентрации наблюдаются в центральной и западной части города, что обусловлено высокой антропогенной нагрузкой, интенсивным транспортным потоком и значительной плотностью населения. В данном районе отмечается максимальная концентрация диоксида азота.

Концентрация диоксида азота в юго-западной части карты свидетельствует о значительном влиянии промышленных и транспортных факторов на качество атмосферного воздуха. Северные районы города демонстрируют существенно более благоприятные показатели концентрации диоксида азота. Более благоприятные экологические условия северного направления обусловлены меньшей плотностью населения, ограниченным транспортным потоком и отсутствием крупных промышленных объектов, влияющих на концентрацию диоксида азота. Особого внимания заслуживают прибрежные территории Финского залива западного направления и район города Колпино, где зафиксированы минимальные значения концентраций диоксида азота. Благоприятная экологическая ситуация в данном районе может быть объяснена несколькими факторами: непосредственным влиянием

морского воздуха, обладающего очищающим эффектом и относительно низкой антропогенной нагрузкой на прибрежные территории данных областей.

Главным источником загрязнения выступает интенсивное движение автотранспорта. Многочисленные магистрали центра, такие как Невский проспект, Литейный проспект и Садовая улица, кольцевые дороги (КАД, ЗСД) формируют устойчивые коридоры распространения вредных выбросов. Особенно заметно влияние крупных транспортных развязок, где наблюдается наложение выбросов от нескольких направлений движения. В часы пиковой нагрузки ситуация существенно ухудшается, что подтверждается данными суточной динамики измерений.

### **3.2 Влияние плотности и высоты застройки на распределение загрязнителя**

Высокие здания, расположенные вдоль узких улиц, создают эффект "городского каньона", который препятствует нормальному рассеиванию загрязняющих веществ. В таких условиях выбросы транспорта накапливаются в приземном слое атмосферы, формируя устойчивые очаги повышенного загрязнения. Особенно это заметно в безветренную погоду, когда отсутствие естественной вентиляции приводит к быстрому росту концентраций вредных веществ. Дополнительным фактором является высокая плотность населения и концентрация объектов инфраструктуры в центральной части города.

Многочисленные рестораны, офисные здания и учреждения создают дополнительную нагрузку на окружающую среду. При этом ограниченные возможности для озеленения в историческом центре снижают естественный потенциал самоочищения атмосферы. Распределение загрязнения в центральном районе имеет выраженную пространственную неоднородность. Наиболее проблемными участками становятся зоны вокруг крупных транспортных узлов и площадей, где фиксируются максимальные концентрации диоксида азота. Сравнение с другими районами города показывает, что центральная часть Санкт-Петербурга стабильно

демонстрирует худшие показатели качества воздуха по содержанию диоксида азота. Это подтверждается как данными мониторинга (рисунок 4), так и визуальным анализом карт распределения загрязнения, где центральный район выделяется наиболее обширными зонами влияния.

№ точки	Адрес	Высота застройки на площадке (м)	Плотность застройки на площадке (%)	Средняя концентрация диоксида азота (мг/м <sup>3</sup> )
1	ул. Профессора Попова, 48	27,00	4,91	0,030
2	г. Колпино, Красная ул., 1а	12,00	6,11	0,010
3	ул. Карбышева, 7	9,00	10,21	0,010
5	пр. Маршала Жукова, 30/3	9,00	11,64	0,250
6	пр. КИМа, 26 лит. А	27,00	20,04	0,300
7	Шпалерная ул., 56	27,00	26,65	0,200
8	ул. Новосельковская, 23	12,00	19,48	0,140
9	Малая Балканская ул., 54	18,00	9,16	0,260
10	Московский пр., 19	18,00	29,87	0,160
12	ул. Пестеля, 1	18,00	34,39	0,220
13	Индустриальный пр., д.64	9,00	12,13	0,340
14	Уткин пр., д.16	6,00	1,72	0,240
15	Кронштадт, ул. Ильмянинова, 4	15,00	18,81	0,100
16	ул. Севастьянова, 11	30,00	24,92	0,270
17	г. Пушкин, Тиньков пер., 4	6,00	4,31	0,160
18	ул. Ольги Форш, 6	27,00	15,13	0,260
19	пр. Ветеранов, дом 167, к. 6/1	36,00	13,94	0,110
20	ул. Тельмана, 24	27,00	28,63	0,210
21	г. Ломоносов, ул. Федюнинского, 3	15,00	16,75	0,120
22	Канонерский остров, 21, стр. 1	15,00	18,00	0,280
23	пр. Динамо, 44	15,00	7,11	0,240
24	В.О.Средний пр., 74	18,00	25,75	0,210
25	пос. Металлострой, Железнодорожная ул., 13	9,00	13,36	0,160

Таблица 1 - Средняя концентрация диоксида азота и параметры городской застройки.

### *Влияние плотности застройки на распределение загрязнителя*

Анализ данных мониторинга качества воздуха в Санкт-Петербурге выявил крайне слабую корреляционную связь между концентрацией диоксида азота и плотностью городской застройки (рисунок 5). Несмотря на ожидания о прямой зависимости уровня загрязнения от степени урбанизации территории, фактическая взаимосвязь оказалась незначительной. Наблюдения показывают, что наиболее высокие концентрации диоксида азота фиксируются не столько в районах с максимальной плотностью застройки, сколько в зонах активного

транспортного движения и вблизи промышленных объектов. При этом в некоторых плотно застроенных жилых районах с ограниченным автомобильным трафиком уровни загрязнения остаются относительно низкими. Такая картина может объясняться комплексом факторов, включая особенности рассеивания загрязняющих веществ в условиях городской застройки, влияние розы ветров и температурных инверсий, а также неравномерное распределение основных источников выбросов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при оценке загрязнения атмосферного воздуха плотность застройки сама по себе не является определяющим фактором, и для достоверной оценки экологической ситуации необходимо учитывать целый ряд дополнительных параметров, таких как расположение транспортных артерий, промышленных зон и особенности местной циркуляции воздушных масс.

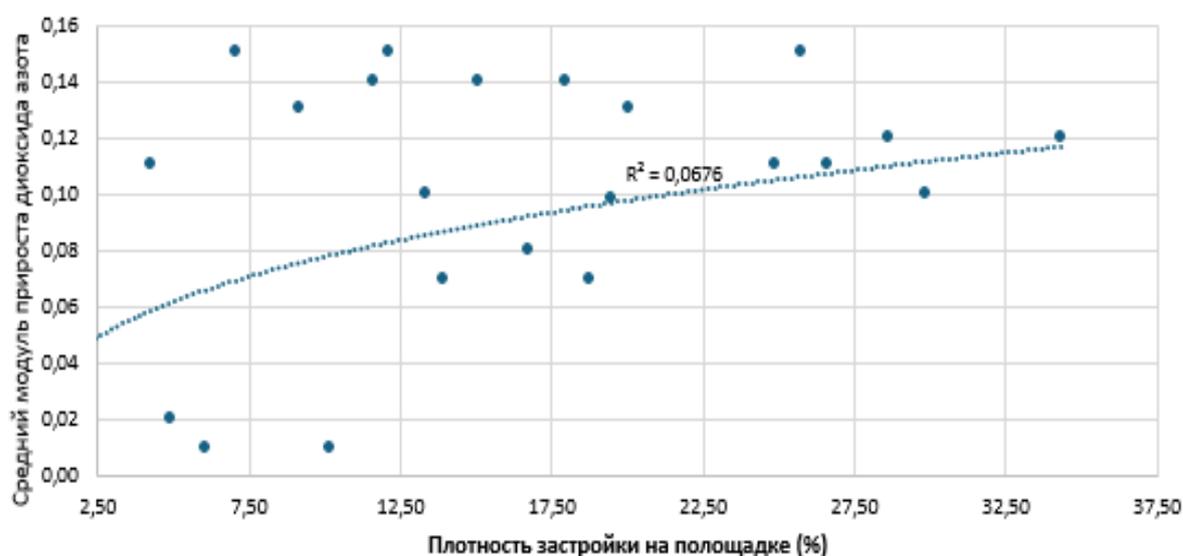


Рисунок 4 – Зависимость среднего модуля прироста диоксида азота от плотности застройки.

#### *Влияние высоты застройки на распределение загрязнителя*

Исследование взаимосвязи между высотой городской застройки и уровнем загрязнения диоксидом азота в Санкт-Петербурге выявило отсутствие корреляционной связи, что ставит под сомнение распространенное предположение о прямой зависимости только между этими параметрами (рисунок 6).

Анализ данных мониторинга показал, что концентрации диоксида азота практически одинаково варьируются как в районах с высотными доминантами, так и в зонах малоэтажной застройки. Наиболее ярко эта закономерность прослеживается при сравнении периферийных районов, где показатели загрязнения остаются умеренными, и центральных территорий, где фиксируются максимальные концентрации загрязнителя. Такое распределение свидетельствует о том, что ключевым фактором, определяющим уровень загрязнения воздуха, является не только высота зданий, а характер хозяйственной деятельности, интенсивность транспортных потоков и многие другие показали в конкретной локации.

При этом в отдельных случаях высотная застройка может создавать эффект "ветровой тени" и "городского каньона" способствуя локальному накоплению загрязняющих веществ, однако это явление носит точечный характер и не формирует устойчивой общегородской тенденции. Полученные результаты подчеркивают сложность процессов распространения загрязнений в городской среде, где традиционные урбанистические параметры, такие как высота застройки, зачастую уступают по значимости другим факторам - особенностям транспортной инфраструктуры, размещению промышленных объектов и специфике местной циркуляции воздушных масс.

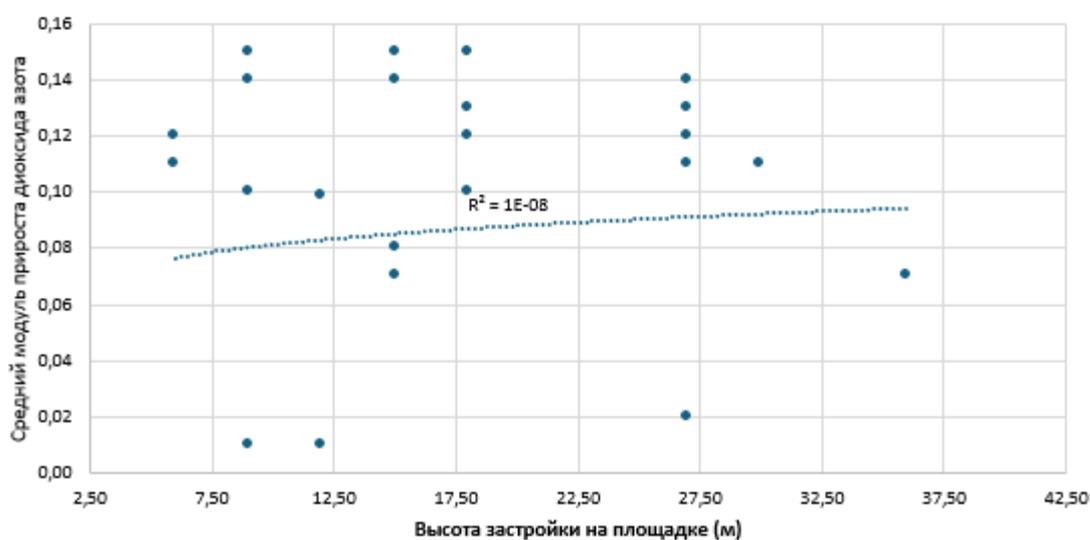


Рисунок 5 – Зависимость среднего модуля прироста диоксида азота от высоты застройки.

### 3.3 Связь факторов загрязнения с метеорологическими условиями

Анализ данных о скорости ветра позволяет охарактеризовать ветровой режим в исследуемом регионе (рисунок 7). Наблюдается относительно небольшой разброс значений скорости ветра между различными точками измерений. Минимальное значение зафиксировано в городе Пушкин на Тильковом переулке, 4 и составляет 2,78 м/с. Максимальная скорость ветра в 3,50 м/с отмечена на проспекте Ветеранов, 167. Средняя скорость ветра по всем точкам измерений составляет приблизительно 3,12 м/с, при этом большинство значений (около 70% данных) попадает в достаточно узкий диапазон от 3,00 до 3,20 м/с. Такая концентрация данных вблизи среднего значения свидетельствует о стабильности ветрового режима на большей части исследуемой территории. Лишь четыре точки выходят за пределы этого интервала: помимо уже упомянутых минимального и максимального значений, к аномалиям можно отнести показатели в Кронштадте (2,86 м/с) и на Московском проспекте (2,85 м/с).

Географическое распределение данных показывает, что пониженные скорости ветра характерны для отдельных локаций, таких как Пушкин, Кронштадт и участок Московского проспекта. Эти территории, подвержены влиянию местных факторов, снижающих ветровую активность. В то же время большинство точек демонстрируют схожие значения скорости ветра, что указывает на отсутствие резких перепадов ветрового режима в пределах исследуемого региона.

Исследование данных о направлении ветра выявило закономерности в распределении воздушных потоков на исследуемой территории. Преобладающее направление ветров имеет четко выраженную юго-западную ориентацию. Среднее значение направления составляет 197 градусов, при этом большинство всех измерений попадают в диапазон от 190 до 220 градусов. Такая концентрация данных свидетельствует о высокой стабильности

ветрового режима в регионе. Наиболее отклоняющиеся значения зафиксированы в городе Пушкин ( $172^\circ$ ) и на улице Карбышева ( $226^\circ$ ), что может быть связано с локальными особенностями рельефа или застройки этих районов. Важно отметить, что распределение направлений носит ярко выраженный сезонный характер - преобладание юго-западных ветров типично для Санкт-Петербурга в летний период. Это объясняется особенностями атмосферной циркуляции и положением центров действия атмосферы. Анализ розы ветров показывает, что ветры северного и восточного направлений встречаются крайне редко.

Анализ температурных данных выявляет относительно небольшой разброс значений по территории. Минимальная температура  $17,7^\circ\text{C}$  зарегистрирована на проспекте Ветеранов, тогда как максимальное значение  $20,0^\circ\text{C}$  отмечено в Кронштадте. Средняя температура по всем точкам наблюдений составляет  $18,8^\circ\text{C}$ , при этом большинство измерений группируются вокруг этого значения с отклонением не более  $1^\circ\text{C}$ .

Пространственное распределение температур показывает некоторые закономерности. Наиболее высокие температуры характерны для прибрежных районов - Кронштадта и Ломоносова, где отмечаются значения  $20,0^\circ\text{C}$  и  $18,8^\circ\text{C}$  соответственно. Несколько пониженные температуры наблюдаются вдоль крупных транспортных магистралей и в промышленных зонах, таких как проспект Ветеранов ( $17,7^\circ\text{C}$ ) и Индустриальный проспект ( $19,1^\circ\text{C}$ ). Общий перепад температур между крайними точками составляет  $2,3^\circ\text{C}$ , что является достаточно умеренным показателем для данной территории.

№ точки	Адрес	Средний модуль прироста	Средняя скорость ветра (м/с)	Среднее направление ветра (град.)	Средняя температура воздуха (°С)
1	ул. Профессора Попова, 48	0,02	3,15	197	18,1
2	г. Колпино, Красная ул., 1а	0,01	3,14	200	18,3
3	ул. Карбышева, 7	0,01	3,30	226	18,1
5	пр. Маршала Жукова, 30/3	0,14	3,04	179	18,8
6	пр. КИМа, 26 лит. А	0,13	3,22	205	18,1
7	Шпалерная ул., 56	0,11	3,15	216	18,7
8	ул. Новосельковская, 23	0,10	3,07	190	19,7
9	Малая Балканская ул., 54	0,13	3,29	206	18,6
10	Московский пр., 19	0,10	2,85	190	19,0
12	ул. Пестеля, 1	0,12	3,12	199	19,1
13	Индустриальный пр., д.64	0,15	3,10	190	19,1
14	Уткин пр., д.16	0,12	3,12	188	18,6
15	Кронштадт, ул. Ильмянинова, 4	0,07	2,86	174	20,0
16	ул. Севастьянова, 11	0,11	3,11	202	19,2
17	г. Пушкин, Тиньков пер., 4	0,11	2,78	172	19,5
18	ул. Ольги Форш, 6	0,14	3,16	198	18,8
19	пр. Ветеранов, дом 167, к. 6/1	0,07	3,50	222	17,7
20	ул. Тельмана, 24	0,12	3,10	212	18,8
21	г. Ломоносов, ул. Федюнинского, 3	0,08	3,11	176	18,8
22	Канонерский остров, 21, стр. 1	0,14	3,21	219	18,4
23	пр. Динамо, 44	0,15	3,10	206	18,6
24	В.О.Средний пр., 74	0,15	3,01	196	19,6
25	пос. Металлострой, Железнодорожная ул., 13	0,10	3,18	193	18,4

Таблица 2 - Средняя концентрация диоксида азота и средняя скорость ветра.

### *Влияние скорости ветра на распределение загрязнителя*

Анализ данных мониторинга выявил, что зависимость между скоростью ветра и концентрацией диоксида азота в городской среде носит слабовыраженный характер (рисунок 8). Графики показывают, что само по себе увеличение скорости ветра не приводит к пропорциональному снижению или увеличению уровня загрязнения. В различных районах города при одинаковых ветровых условиях фиксируются существенно отличающиеся концентрации диоксида азота, что свидетельствует о наличии более сложной системы взаимосвязей. Важно отметить, что характер распространения загрязнителей определяется не столько абсолютной скоростью ветра, сколько сочетанием множества параметров: направления воздушных потоков, температурной стратификации атмосферы, рельефа местности и плотности

застройки. Все эти факторы взаимодействуют сложным образом, формируя уникальную картину распределения загрязнений для каждого конкретного района города. Поэтому попытки прогнозировать уровень загрязнения, опираясь исключительно на данные о скорости ветра, без учета других значимых параметров, не могут дать достоверных результатов.

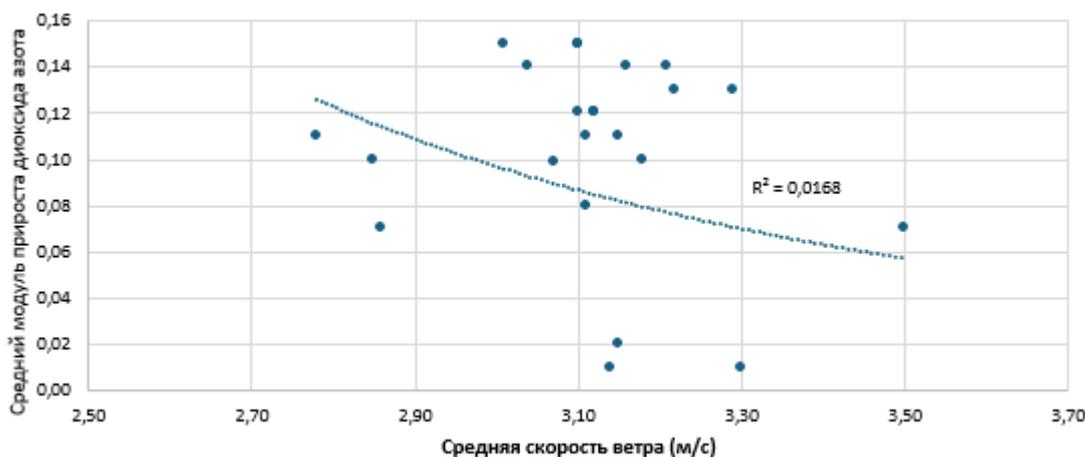


Рисунок 6 – Зависимость среднего модуля прироста диоксида азота от средней скорости ветра.

#### *Влияние направления ветра на распределение загрязнителя*

Взаимосвязь между направлением ветра и концентрацией диоксида азота в городской среде отсутствует (рисунок 9). Практические наблюдения показывают сложную и неоднозначную картину распределения загрязнителей. Даже при устойчивых ветрах одного направления в разных районах города фиксируются совершенно разные уровни концентрации диоксида азота. Это объясняется тем, что на распространение загрязняющих веществ влияет целый комплекс взаимосвязанных факторов, среди которых направление ветра является лишь одним из многих параметров.

Все эти факторы взаимодействуют между собой, формируя сложную картину распределения загрязнений, которую невозможно объяснить только направлением ветра. Поэтому при анализе качества городского воздуха необходимо учитывать весь комплекс влияющих параметров, а не ограничиваться лишь данными о направлении воздушных потоков.

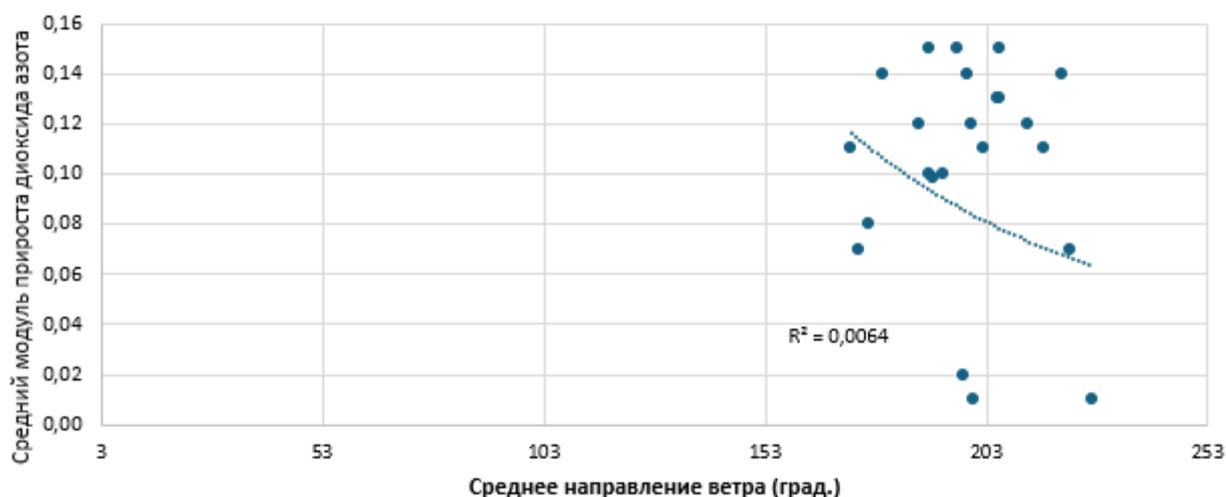


Рисунок 7 – Зависимость среднего модуля прироста диоксида азота от среднего направления ветра.

### *Влияние температуры воздуха на распределение загрязнителя*

Анализ влияния температуры воздуха на концентрацию диоксида азота в городской среде показал отсутствие выраженной зависимости между этими параметрами (рисунок 10). Наблюдения за летний период 2022 года в Санкт-Петербурге выявили, что колебания температуры в диапазоне от +15 до +25°C практически не отражаются на уровне загрязнения. Более того, в дни с одинаковыми температурными показателями фиксировались существенно различающиеся концентрации диоксида.

При этом в условиях городской среды температурный фактор нивелируется эффектом "острова тепла", когда разогретые асфальтовые покрытия и стены зданий создают собственные конвекционные потоки. Эти локальные воздушные движения часто преобладают над общим температурным фоном, определяя характер распределения загрязняющих веществ. Таким образом, данные мониторинга подтверждают, что температура воздуха сама по себе не может служить надежным индикатором уровня загрязнения диоксидом азота в городских условиях.

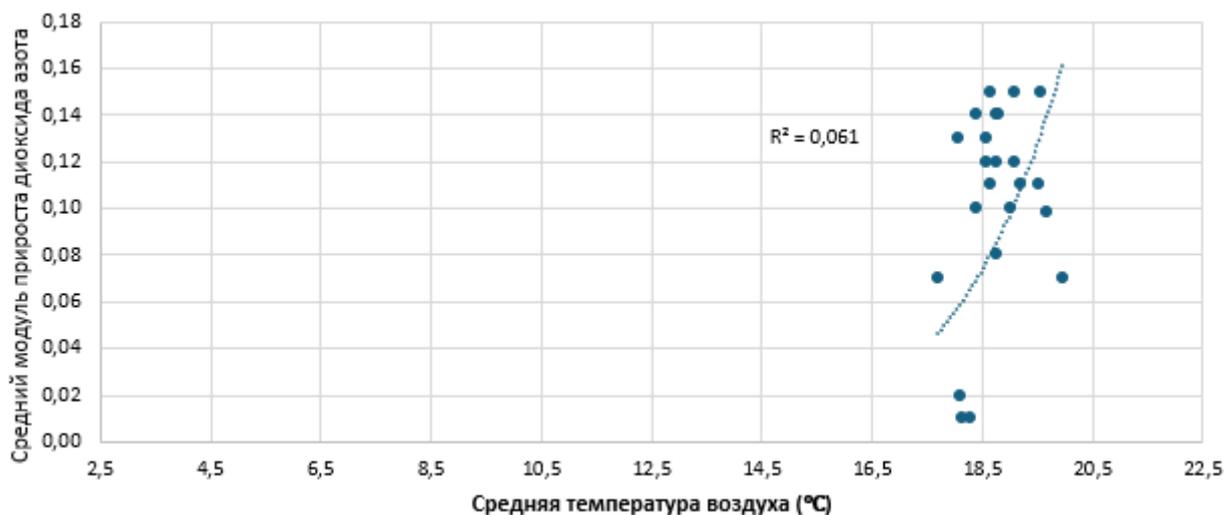


Рисунок 8 – Зависимость среднего модуля прироста диоксида азота от средней температуры воздуха.

Исследование метеорологических параметров - температуры, скорости и направления ветра - без учета их взаимосвязи и комплексного воздействия с урбанистическими характеристиками города ведет к отсутствию корреляционной связи с концентрацией диоксида азота. Реальное распространение диоксида азота в городской среде определяется сложной системой взаимодействующих факторов. Метеоусловия проявляют свое влияние только в сочетании с конкретными особенностями городской застройки, формирующими уникальную аэродинамику каждого района, распределением зеленых зон, спецификой транспортных потоков и расположением промышленных зон.

Аналогично, температурные инверсии по-разному влияют на накопление загрязнений в зависимости от планировочных особенностей территории. Это объясняет, почему первоначальный анализ, рассматривавший каждый параметр изолированно, не выявил значимых корреляций. Для получения достоверных результатов необходимо учитывать комплексное взаимодействие всех значимых факторов - как метеорологических, так и урбанистических, - что требует применения других методов анализа и разработки моделей городской среды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования пространственного распределения диоксида азота в атмосфере Санкт-Петербурга был получен ряд значимых результатов, позволяющих глубже понять закономерности формирования загрязнения воздуха в условиях мегаполиса. Анализ данных мониторинга качества воздуха показал, что существующая сеть наблюдений обеспечивает репрезентативную основу для оценки пространственного распределения загрязнителей. Выбор диоксида азота в качестве модельного вещества оказался оправданным, поскольку этот загрязнитель обладает характеристиками, делающими его удобным индикатором антропогенного воздействия. Его способность сохраняться в атмосфере достаточное время для пространственного анализа, но не настолько долго, чтобы полностью рассеиваться, создает характерную картину "пятнистого" распределения с четко выраженными очагами загрязнения.

Пространственный анализ выявил неравномерное распределение концентраций диоксида азота по территории города. Наиболее высокие показатели зафиксированы в центральной и западной частях Санкт-Петербурга, что связано с высокой плотностью транспортных потоков, интенсивной антропогенной нагрузкой и значительной плотностью населения. В этих районах отмечаются максимальные концентрации, формирующиеся под влиянием крупных магистралей, таких как Невский проспект, Литейный проспект, Садовая улица, а также кольцевых автодорог (КАД, ЗСД). Особенно выраженный вклад в загрязнение вносят транспортные развязки, где происходит наложение выбросов от нескольких направлений движения. Юго-западные районы города также демонстрируют повышенные концентрации диоксида азота, что объясняется сочетанием промышленных и транспортных факторов. В то же время северные территории отличаются более благоприятными показателями качества воздуха благодаря меньшей плотности застройки, ограниченному транспортному потоку и отсутствию крупных

промышленных объектов. Наименьшие концентрации зафиксированы в прибрежных зонах Финского залива и районе Колпино, где очищающее влияние морского воздуха и низкая антропогенная нагрузка создают благоприятные экологические условия.

Анализ воздействия характеристик городской инфраструктуры на распространение загрязняющих веществ выявил ряд неочевидных закономерностей. Анализ показал крайне слабую корреляцию между концентрацией диоксида азота и плотностью застройки, что противоречит распространенному представлению о прямой зависимости уровня загрязнения от степени урбанизации территории. Фактически наиболее высокие концентрации наблюдаются не в районах с максимальной плотностью зданий, а в зонах активного транспортного движения и вблизи промышленных объектов. Это свидетельствует о том, что плотность застройки сама по себе не является определяющим фактором, а ключевую роль играет расположение источников выбросов. Аналогично, исследование взаимосвязи между высотой застройки и уровнем загрязнения не выявило значимой корреляции. Концентрации диоксида азота варьируются независимо от этажности зданий, хотя в отдельных случаях высотная застройка может создавать эффект "городского каньона", способствуя локальному накоплению загрязняющих веществ.

Анализ влияния метеорологических условий на распределение загрязнителя также продемонстрировал отсутствие выраженных зависимостей. Скорость ветра не оказывает прямого воздействия на уровень концентраций диоксида азота. В разных районах города при одинаковых ветровых условиях фиксируются существенно отличающиеся показатели загрязнения, что указывает на более сложную систему факторов, включая особенности городской аэродинамики, температурную стратификацию и рельеф местности. Направление ветра, несмотря на преобладание юго-западных потоков в летний период, также не показывает четкой связи с пространственным распределением загрязнения. Это объясняется тем, что на

распространение загрязняющих веществ влияет комплекс взаимосвязанных параметров, среди которых направление ветра является лишь одним из многих.

Температура воздуха не продемонстрировала значимого влияния на концентрацию диоксида азота. В летний период колебания температуры практически не отражались на уровне загрязнения. Это связано с эффектом "городского острова тепла", когда локальные конвекционные потоки, создаваемые разогретыми поверхностями, преобладают над общим температурным фоном. Таким образом, ни один из рассмотренных метеорологических параметров по отдельности не может служить надежным индикатором уровня загрязнения, что подчеркивает необходимость комплексного подхода к анализу.

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что пространственное распределение диоксида азота в Санкт-Петербурге формируется под воздействием сложного взаимодействия антропогенных и природных факторов, причем ведущая роль принадлежит транспортной нагрузке и расположению промышленных зон. Параметры городской застройки и метеорологические условия, не демонстрируют прямой зависимости с уровнем загрязнения, если рассматриваются изолированно.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для разработки мер по улучшению качества городского воздуха и планированию мониторинговых наблюдений. Они указывают на необходимость учета комплексного взаимодействия всех значимых факторов при оценке и прогнозировании экологической ситуации в мегаполисе.

## ЛИТЕРАТУРНЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ясовеев, М. Г. Экология урбанизированных территорий: учебное пособие / М. Г. Ясовеев, Н. Л. Стреха, Д. А. Пацыкайлик; под ред. проф. М. Г. Ясовеева. — Москва: ИНФРА-М, 2022. — 293 с.
2. Мохаммад, М. А. Лесные пожары: угроза природе и человеку, ликвидация, профилактика / М. А. Мохаммад, Л. А. Крысенко // Юный ученый. — 2024. — № 1 (75). — С. 53–60. — URL:<https://moluch.ru/young/archive/75/4003/> (дата обращения: 10.03.2024).
3. Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии Кузбасса [Электронный ресурс]. — URL:<http://kuzbasseco.ru> (дата обращения: 15.04.2024).
4. Матвеев, Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы / Л. Т. Матвеев. — 2-е изд., перераб. и доп. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. — 751 с.
5. Спиридонова, О. Г. Ядовитые газы / О. Г. Спиридонова. — Москва: 2006. — С. 331–333.
6. Тарасов, Л. В. Атмосфера нашей планеты / Л. В. Тарасов. — Москва: Физматлит, 2012. — 13 с.
7. Официальный сайт Всемирной организации здравоохранения [Электронный ресурс]. — URL:<https://www.who.int/ru>.
8. Смагина, А. А. Динамика временных рядов приземной концентрации озона в воздухе Санкт-Петербурга / А. А. Смагина. — Санкт-Петербург, 2022.- URL:[http://elib.rshu.ru/files\\_books/pdf/rid\\_92663a177ba04dc5924ffe91f93ce335.pdf](http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_92663a177ba04dc5924ffe91f93ce335.pdf)
9. Ри, А. У. Формирование архитектурно-пространственного своеобразия городов на основе градоформирующих свойств рельефа / А. У. Ри // Вестник ИрГТУ. — 2012. — № 11 (70). — URL:

- <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-arhitekturno-prostranstvennogo-svoeobraziya-gorodov-na-osnove-gradoformiruyuschih-svoystv-reliefa> (дата обращения:10.09.2024).
- 10.Постановление Правительства Российской Федерации от 29.06.2023 № 1076 «О внесении изменений в правила установления санитарно-защитных зон».
  - 11.Градостроительное проектирование. Квартал: методические указания к выполнению курсового проекта для студентов направления 07.03.04 «Градостроительство» / сост. А. Г. Кучина, Е. И. Гурьева, Г. М. Величко. — Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. — 32 с.
  - 12.Управление в городском хозяйстве: учебное пособие / под ред. Р. Сираждинова. — Москва: 2009. — 352 с.
  - 13.Будилова, Е. В. Связь демографических показателей здоровья населения и экологических факторов в городах России / Е. В. Будилова, М. Б. Лагутин // Вестник Московского университета. Серия 23. Антропология. — 2021. — № 3. — URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/svyaz-demograficheskikh-pokazateley-zdorovya-naseleniya-i-ekologicheskikh-faktorov-v-gorodah-rossii> (дата обращения:20.12.2024).
  - 14.Павленков, М. Н. Особенности образования и основные источники загрязнения городской территории / М. Н. Павленков, П. М. Воронин // Теория и практика общественного развития. — 2013. — № 12. — URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-obrazovaniya-i-osnovnye-istochniki-zagryazneniya-gorodskoy-territorii-1> (дата обращения:10.01.2025).
  - 15.Иванова, Ю. П. Влияние метеорологических условий на рассеивание вредных выбросов в городской среде / Ю. П. Иванова [и др.] // ИВД. — 2020. — № 1 (61). — URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-meteorologicheskikh->

- [usloviy-na-rasseivanie-vrednyh-vybrosov-v-gorodskoy-srede](#) (дата обращения: 15.02.2025).
16. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий: РД 52.04.212-86 / Госкомгидромет СССР. — Введ. 1986-09-04. — Москва: Гидрометеиздат, 1986. — 94 с.
17. Распространение загрязнителей в атмосфере: учебное пособие / Томский государственный университет. — URL: [https://lms.tsu.ru/pluginfile.php/121779/mod\\_resource/content/2/5%20гл.%20.pdf](https://lms.tsu.ru/pluginfile.php/121779/mod_resource/content/2/5%20гл.%20.pdf) (дата обращения: 20.03.2025).
18. Трифонов, К. И. Мониторинг формальдегида в атмосферном воздухе в городах Российской Федерации / К. И. Трифонов // Известия Самарского научного центра РАН. — 2014. — № 1-7. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/monitoring-formaldegida-v-atmosfernom-vozdruhe-v-gorodah-rossiyskoy-federatsii> (дата обращения: 10.04.2025).
19. Калаева, С. З. Влияние мелкодисперсной пыли на биосферу и человека / С. З. Калаева [и др.] // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2016. — № 3. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-melkodispersnoy-pyli-na-biosferu-i-cheloveka> (дата обращения: 25.04.2025).
20. Воскобойникова, В. А. Кислотные осадки как следствие антропогенного фактора / В. А. Воскобойникова // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. — 2021. — № 1-3. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kislotnye-osadki-kak-sledstvie-antropogennogo-faktora> (дата обращения: 15.05.2025).
21. RP5. Метеорологический сайт [Электронный ресурс]. - URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 18.05.2025).

22. Яндекс.Карты [Электронный ресурс]. —  
URL: <https://yandex.ru/maps> (дата обращения: 18.05.2025).
23. 2ГИС. Санкт-Петербург [Электронный ресурс]. —  
URL: <https://2gis.ru/spb> (дата обращения: 18.05.2025).
24. Экологический портал Санкт-Петербурга [Электронный ресурс].  
— URL: <https://www.infoeco.ru> (дата обращения: 20.05.2025).