

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Химическая технология и ресурсосбережение»

(наименование)

18.04.01 Химическая технология

(код и наименование направления подготовки)

Рациональное использование природных и сырьевых ресурсов в химической технологии и  
нефтехимии

(направленность (профиль))

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Оптимизация метода построения моделей загрязнения атмосферного воздуха  
выбросами автотранспорта

Обучающийся

Д.Ю. Копеистова

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

канд. пед. наук, доцент М.В. Кравцова

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 Теоретический анализ существующей системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха .....	10
1.1 Экологический мониторинг и анализ нормативно-правовой базы для возможности его использование .....	10
1.2 Проблемы формирования перечня ЗВ в выбросах в атмосферный воздух, подлежащих определению и контролю .....	16
1.3 Анализ качества атмосферного воздуха на территории РФ.....	19
Глава 2 Анализ существующих математических моделей, используемых для описания пространственного распределения загрязнителей атмосферного воздуха (промышленных выбросов и выбросов автотранспорта) .....	30
2.1 Сравнительный анализ математических моделей .....	30
2.2 Анализ необходимых входных критериев для расчета (идентификации моделей) .....	36
2.3 Обоснование выбора предикторов для расчета .....	39
2.4 Анализ экспериментальных данных на территории городского округа Тольятти .....	46
Глава 3 Разработка прогностической модели для оценки качества атмосферного воздуха от выбросов автотранспорта и промышленных предприятий для г.о. Тольятти .....	49
3.1 Регрессионный анализ модели рассеивания оксидов азота в атмосферном воздухе.....	53
3.2 Регрессионный анализ модели рассеивания диоксида серы в атмосферном воздухе.....	57

3.3 Регрессионный анализ модели рассеивания оксида углерода в атмосферном воздухе.....	61
3.4 Регрессионный анализ модели рассеивания взвешенных веществ в атмосферном воздухе.....	64
3.5 Анализ расчетных данных .....	68
Глава 4 Предложения по оптимизации системы автоматизированного мониторинга качества атмосферного воздуха на автотранспортных магистралях г.о. Тольятти. ....	83
Заключение .....	93
Список используемой литературы и используемых источников.....	95

## Введение

В последние годы в связи с ростом промышленности и автотранспорта не обеспечиваются показатели качества атмосферного воздуха на селитебных территориях. В рамках среднего промышленного города может существовать до миллиона источников выбросов вредных веществ, многие из них даже не нормируются. Вредные вещества попадают в атмосферный воздух, воду, почву, а затем в живые организмы, в том числе и воздействуют на организм человека.

Для прогнозирования состояния окружающей среды на селитебных территориях и повышения качества атмосферного воздуха, а также снижения рисков распространения загрязняющих веществ необходимо сформировать новый подход к прогностической модели и, как следствие, к проведению экологического мониторинга, представляющий собой совокупность организационных структур, методов, способов и приемов наблюдения за состоянием окружающей среды.

В настоящее время в современном мире образуется огромное количество источников выбросов и непрерывно пополняется перечень загрязняющих веществ, что в свою очередь затрудняет проведение экологического мониторинга, ставит под сомнение в целом его результаты, и доставляет определенные сложности формирования цифровой модели экологического мониторинга.

Основными недостатками текущей ситуации являются:

- существенный дефицит данных о качестве атмосферного воздуха, невысокий уровень автоматизации и оперативности их сбора и обработки;
- сеть Росгидромета, являющаяся основным элементом национальной сети мониторинга, с 612 постами наблюдения в 221 городах покрывает лишь 33% от минимального норматива Минприроды, определенного в №524-пр от 30.07.2020 [20]. Отметим, что данные нормативы

с советского времени заметно не менялись, несмотря, например, на 5- кратный рост автопарка в стране;

- уровень автоматизации измерений на сети Росгидромета остается низким, доминирует ручной отбор проб 3-4 раза в сутки. Данные на практике часто формируются только на следующий день;

- региональные сети автоматического мониторинга за исключением ряда отдельных крупнейших городов не получили широкого распространения как по причине дороговизны традиционных решений, так и необходимости существенных вложений в развитие материально-технической базы для эксплуатации оборудования и специализированной подготовки персонала;

- разрозненность и закрытость данных – даже те данные, которые сейчас собираются, хранятся, анализируются и используются каждым из участников автономно. Это приводит на практике к фрагментарности взглядов, трактовок, выводов;

- разрыв между расчетным и инструментальным мониторингом – после разработки сводных томов ПДВ города, не имея соответствующих сетей мониторинга, не могут извлечь значимую практическую пользу для оперативного управления экологической безопасностью и улучшения окружающей среды;

- недостатки, указанные выше формируют значимую социальную проблему – недоверие населения к органам власти. В наиболее неблагополучных городах люди вынуждено создают «народные» сети мониторинга на любительском оборудовании, что приводит к еще большему разобщению власти и населения из-за разницы в данных и их интерпретации.

Проблему можно решить, используя при формировании цифровой модели экологического мониторинга соответствующий математический аппарат или соответствующие математические модели, которые, в настоящее время, разработаны, но использование их в тех или иных задачах необходимо обосновывать исходя из требований к территории, к экономическим условиям развития территории и так далее, поэтому в настоящем исследовании будет

рассмотрена проблема определение распространения загрязняющих веществ от передвижных источников основных автомагистралей города при использовании современного математического аппарата модели, при котором данную модель можно эффективно использовать для прогнозирования распространение приземных концентраций загрязняющих веществ на селитебную территорию.

Система представляет собой единый комплекс решений, включающий нормативно-правовую, организационную, техническую, информационную, программно-технологические базы и компоненты, предназначенный для сбора, хранения, обработки, анализа информации о состоянии окружающей среды на территории Российской Федерации.

Система создается на интеграции имеющихся и планируемых к развитию и внедрению информационных ресурсов министерств и ведомств, субъектов, хозяйствующих объектов, участников экологического мониторинга на территории Российской Федерации.

Основная проблема также состоит в том, что нет апробированной математической модели, которая могла бы или учитывать, или сформировать зону распространения загрязнения при учете факторов как метеорологических, так и физических (интенсивность автомобилей, загрузка дорог и т.п.).

Объект исследования: селитебная территория г.о. Тольятти в зоне воздействия выбросов от передвижных источников автомагистралей.

Предмет исследования: зависимость распространения загрязняющих веществ от передвижных источников вблизи автомагистралей селитебной территории от метеорологических и физических факторов.

Целью магистерской диссертации является разработка прогностической модели распространения загрязняющих веществ от передвижных источников на селитебных территориях.

Гипотеза исследования предполагает эффективность прогностической системы моделирования распространения загрязняющих веществ от

передвижных источников автомагистралей на селитебную территорию за счет возможности обеспечения оперативно выстраивать систему экологической безопасности.

В работы были поставлены следующие задачи:

– провести анализ существующей системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха и ее использования в качестве прогностической модели;

– провести анализ существующих математических моделей для описания пространственного распределения загрязнителей атмосферного воздуха от передвижных источников автотранспорта;

– предложить прогностическую модель для оценки качества атмосферного воздуха от выбросов передвижных источников автотранспорта для г.о. Тольятти;

– представить рекомендации по оптимизации системы автоматизированного мониторинга качества атмосферного воздуха на автотранспортных магистралях г.о. Тольятти.

Теоретико-методологическую основу исследования составили научные работы отечественного ученого Антропова К.М. в области исследования пространственного распределения загрязнения атмосферного воздуха методом математического моделирования.

Методы исследования: аналитические и экспериментальные исследования при использовании учебных и научных лабораторий Тольяттинского государственного университета.

Опытно-экспериментальная база исследования: исследования проводились с использованием ресурсов НАЦ «Физико-химических и экологических исследований» на базе Тольяттинского государственного университета.

Научная новизна исследования: научная новизна состоит в использовании математического моделирования на основе регрессионного анализа для формирования прогностической модели оценки качества

атмосферного воздуха от выбросов передвижных источников автотранспорта на территории г.о. Тольятти с учетом приоритетных загрязняющих веществ и экспериментальных данных.

Теоретическая значимость исследования заключается в:

- систематизации существующих прогнозных моделей для оценки качества атмосферного воздуха и их возможного использования на территории селитебной зоны вблизи автомагистралей;

- предложении к оптимизации существующей системы мониторинга на территории г.о.Тольятти (определении основных приоритетных загрязняющих веществ для исследуемого объекта и предикторов, влияющих на их распространение и т.д);

- обосновании и предложении автоматизированной системы экологического мониторинга с учетом опыта субъектов Российской Федерации и возможной адаптации на территории города Тольятти.

Практическая значимость исследования состоит в предложении прогностической модели для оценки качества атмосферного воздуха от выбросов передвижных источников автотранспорта для г.о. Тольятти с учетом обоснования основных предикторов, влияющих на их распространение, а также в предложении оптимизации существующей системы автоматизированного экологического мониторинга.

Достоверность и обоснованность результатов исследования обеспечивались: результатами экспериментальных исследований НАЦ «Физико-химических и экологических исследований» за последние три года, а также результатами научных исследований в области применения математического моделирования для оценки качества атмосферного воздуха.

Личное участие автора в организации и проведении исследования состоит в представлении аналитического обзора разделов исследования, обосновании, предложении и составлении прогностической модели для оценки качества атмосферного воздуха от выбросов передвижных источников автотранспорта для г.о. Тольятти с учетом обоснования основных



предикторов, влияющих на их распространение. Формировании предложений по оптимизации существующей системы автоматизированного экологического мониторинга-на территории г.о. Тольятти.

Апробация и внедрение результатов велись в течение всего исследования и оформлены в виде научных статей и тезисов:

– Крайнов В.А., Копеистова Д.Ю. Анализ подходов к моделированию выбросов в атмосферный воздух – Сборник «Молодежь. Наука. Общество» 2022;

– Копеистова Д.Ю., Крайнов В.А., Кравцова М.В. Математическая модель для оценки качества атмосферного воздуха от выбросов передвижных источников автотранспорта – Научное сетевое издание «E-Scio.ru», 2023.

Результаты исследования докладывались на следующих конференциях:

– Всероссийская студенческая научно-практическая междисциплинарная конференция «Молодежь.Наука.Общество», Тольятти, 2022 год.

На защиту выносятся:

– прогностическая модель для оценки качества атмосферного воздуха от выбросов передвижных источников автотранспорта для г.о.Тольятти, основанная на регрессионном подходе моделирования;

– предложения по оптимизации сети автоматизированного экологического мониторинга на территории города Тольятти.

Структура магистерской диссертации.

Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка используемой литературы и используемых источников (31 источник) и содержит 38 рисунков, 29f таблиц, 16 формул. Основной текст работы изложен на 99 страницах.

# **Глава 1 Теоретический анализ существующей системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха**

## **1.1 Экологический мониторинг и анализ нормативно-правовой базы для возможности его использование**

Важность создания эффективной системы управления качеством атмосферного воздуха в Российской Федерации обусловлена следующими причинами:

- высокой социальной платой за загрязнение атмосферного воздуха, оцениваемой для РФ специалистами ВОЗ в размере ежегодной дополнительной смертности от этой причины до 140 тыс. человек;
- высокими экономическими потерями, исчисляемыми по разным оценкам в диапазоне 1,9-4,9% ВВП.

Учитывая экономические и социальные цели государственной политики, игнорировать решение данной задачи, в т.ч. создание эффективной и целенаправленной системы мониторинга невозможно.

Задачами экологического мониторинга являются:

- контроль за соблюдением государственных нормативов и международных стандартов;
- регулярные наблюдения за состоянием окружающей среды, в том числе компонентов природной среды, естественных экологических систем, за происходящими в них процессами, явлениями, изменениями состояния окружающей среды;
- выявление источников загрязнения;
- хранение, обработка (обобщение, систематизация) информации о состоянии окружающей среды;
- анализ полученной информации в целях своевременного выявления изменений состояния окружающей среды под воздействием

природных и (или) антропогенных факторов, оценка и прогноз этих изменений;

- проведение оценки воздействия на здоровье;
- обеспечение органов государственной власти, органов местного самоуправления, юридических лиц, индивидуальных предпринимателей, граждан информацией о состоянии окружающей среды;
- информирование населения о качестве атмосферного воздуха и предупреждение о резком повышении уровня загрязнения.

В настоящее время в РФ действуют несколько обособленных систем наблюдения за качеством атмосферного воздуха.

Деятельность этих систем осуществляется следующими структурами:

- Росгидромет – федеральная сеть наблюдения;
- Региональные органы власти (РОИВ) – территориальные системы наблюдения;
- Роспотребнадзор – наблюдения за качеством воздуха в городах и на границах санитарно-защитных зон предприятий с целью оценки воздействия на здоровье и благополучие граждан;
- Росприроднадзор – контроль за выбросами предприятий и воздействием на окружающую среду;
- промышленные предприятия – природопользователи – контроль за выбросами, контроль за качеством воздуха на границе санитарно-защитной зоны.

В статье 65 Федерального закона от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» [26] представлена структура обеспечения государственного экологического контроля (надзора) (рис.1).



Рисунок 1 – Структура обеспечения государственного экологического контроля (надзора)

Согласно Федеральному закону от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 26.03.2022) «Об охране окружающей среды» (с изменениями и дополнениями, вступивший в силу с 01.09.2022 года) [26]:

– «требования в области охраны окружающей среды (далее также - природоохранные требования), предъявляемые к хозяйственной и иной деятельности обязательные условия, ограничения или их совокупность, установленные законами, иными нормативными правовыми актами, нормативами в области охраны окружающей среды, федеральными нормами и правилами в области охраны окружающей среды и иными нормативными документами в области охраны окружающей среды» [2];

– «приказ Росприроднадзора от 30.12.2020 № 1839 (ред. от 06.09.2022) «Об утверждении перечня нормативных правовых актов (их отдельных положений), содержащих обязательные требования»» [21].

Уровни государственного экологического надзора, обеспечивающие регулирования в сфере качества атмосферного воздуха на территории РФ представлены на рисунке 2, они включают федеральный и региональный

надзор. П.п.7.1 7-ФЗ с 11 августа 2020 – если один из объектов НВОС подлежит ФГЭН, то все объекты подлежат ФГЭН.

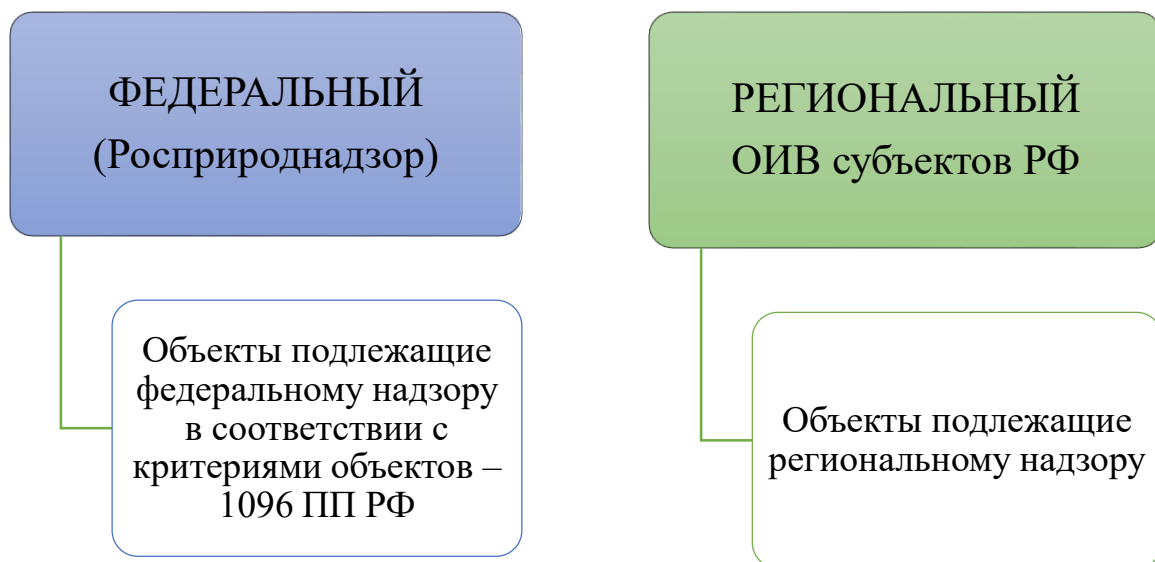


Рисунок 2 – Уровни государственного экологического надзора

Основные нормативные правовые акты:

- Федеральный закон от 31.07.2020 № 248-ФЗ «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации» (вступает в силу с 01.07.2021) [24];
- Федеральный закон от 26.12.2008 № 294-ФЗ «О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля» [25];
- «Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях» от 30.12.2001 № 195-ФЗ» [13];
- Постановление Правительства РФ от 30.06.2021 № 1096 О федеральном государственном экологическом контроле (надзоре) (вместе с Положением о федеральном государственном экологическом контроле (надзоре)) действует с 7 июля 2021 года [18];

– Постановление Правительства РФ от 18.09.2020 № 1496 «О признании утратившими силу некоторых актов...» [17];

– Постановление от 10 марта 2023 года №372 именно ограничения проведения плановых проверок только в отношении определенных объектов до 2030 года [19].

Плановые проверки будут назначаться в отношении следующих объектов контроля:

– отнесённых к категориям чрезвычайно высокого и высокого риска причинения вреда;

– опасных производственных объектов и гидротехнических сооружений II класса опасности;

Помимо инструментального мониторинга для городов и предприятий используется расчетный мониторинг, результатами которого являются сводные тома ПДВ для городов и проекты ПДВ для предприятий.

Для создания эффективной системы мониторинга за качеством воздуха в России необходимо решить несколько задач:

- определить главной целью развития сетей мониторинга в стране повышение уровня экологической безопасности и снижение рисков для здоровья и благополучия граждан;

- основным фокусом развития определить территориальные и локальные (производственные) сети наблюдения за качеством атмосферного воздуха, как источник оперативной информации для руководителей, специалистов и граждан на местах.

В отношении количества точек мониторинга в городах:

– минимальное количество определить в соответствии с №524-пр Минприроды от 30.07.2020;

– целевое количество точек мониторинга определяется по итогам проектирования (сводных расчетов по городам);

– для опасных промышленных объектов - предприятий I класса опасности, полигонов ТКО, мусороперерабатывающих предприятий, очистных

сооружений и т.п. предусмотреть требования обязательного оснащения автоматической системой мониторинга периметра СЗЗ;

- все существующие и новые источники данных вне зависимости от ведомственной принадлежности должны передавать данные в разрабатываемую комплексную систему мониторинга качества окружающей среды;

- данные системы должны быть максимально доступны для специалистов, отвечающих за управление улучшениями качества окружающей среды, в том числе воздуха.

Указанный пул задач логически связан между собой и обязателен к реализации для достижения реального прогресса. Разработка комплексной системы мониторинга (аналитической платформы) без развития систем мониторинга не позволит предоставить значимую ценность пользователям по причине дефицита/отсутствия необходимых данных.

Таким образом, обеспечение кратного роста объема данных является одним из важнейших условий успешного функционирования комплексной системы мониторинга. При внедрении автоматических систем мониторинга необходимо использовать комбинированный подход, сочетающий использование традиционных и компактных постов мониторинга.

В независимых экспертных обзорах под эгидой Всемирной метеорологической организации, Всемирной организации здравоохранения, ООН и др. подтверждается прогресс компактных устройств мониторинга и достижение определенного уровня зрелости, который позволяет рассматривать его практическое применение для решения профессиональных задач. Данные устройства могут быть использованы:

- как дополнительный инструмент наблюдений за качеством воздуха, повышающий пространственное разрешение существующих эталонных решений мониторинга, для формирования плотных сетей мониторинга в городах;

- для оценки качества воздуха в локациях, где измерения в настоящее

время не проводятся или проводятся эпизодически.

Таким образом, в крупных городах будут использованы традиционные решения, которые по периферии и около опасных промышленных объектов будут дополняться компактными постами мониторинга. В небольших городах, где мониторинг не проводится, по экономическим причинам целесообразно рассматривать компактные устройства мониторинга.

Примеры реализации такого подхода есть и в России, например, в Московской области. Регион за счет бюджета развивает гибридную сеть мониторинга. Помимо этого, на административном уровне некоторые хозяйствующие субъекты (полигоны ТКО, МПК) обязуются создавать локальные фрагменты единой сети мониторинга по периметру СЗЗ объектов.

## **1.2 Проблемы формирования перечня ЗВ в выбросах в атмосферный воздух, подлежащих определению и контролю**

Нормирование выбросов осуществляется:

- на основе инвентаризации по всем загрязняющим веществам;
- в отношении загрязняющих веществ, включенных в Перечень: 160 загрязняющих веществ (кроме радиоактивных) для объектов ОНВ I категории (I, II классов опасности), II категории (всех по перечню), III категории (I, II классов опасности);
- расчетным путем на основе гигиенических нормативов с учетом фонового состояния.

Нормативы качества атмосферного воздуха согласно СанПиН «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» «ПДУ 716 ЗВ + ОБУВ 1741 ЗВ + классы опасности» [16].

В таблицу 1 сведены проблемы контроля ЗВ с учетом существующей нормативной базы.



Таблица 1 – Позиция Росприроднадзора по отношению к контролю загрязняющих веществ

Структура	Содержание позиции
<p>Письмо Росприроднадзора, 2017 г., письмо Минприроды России, 2019 г.</p>	<p>ЗВ, относящиеся к твердым частицам, присутствующие в Перечне и индивидуально переименованы, нормируются индивидуально (отдельно по каждому из таких веществ). Остальные целесообразно учитывать, как «взвешенные вещества».</p> <p>В отношении ЗВ, для которых ставки платы за НВОС не установлены, плата не исчисляется. Вместе с тем, выбросы таких веществ, как пыль абразивная, углерод (сажа), железа оксид, по своим физическим свойствам, относящимся к тёртым частицам, целесообразно учитывать в составе выбросов как взвешенные вещества. Соответственно, плата в таком случае исчисляется исходя из ставок платы в зависимости от размера твердых частиц.</p>
<p>Письмо Росприроднадзора, 2022 г.</p>	<p>Перечень писем и информации, размещенной на официальном сайте, не подлежащий применению, содержит указание на письмо Росприроднадзора 2017 г.</p>
<p>Позиция Минприроды России, Росприроднадзора 2020-2022 г.г.</p>	<p>Перечень ЗВ, включаемых в программу ПЭК, определятся хозяйствующим субъектом самостоятельно с учетом применяемых технологий и особенностей процесса.</p> <p>Законодательство в области охраны окружающей среды содержит требований в части обязательного включения ЗВ в программу ПЭК, но не содержит ограничений для включения иных веществ.</p> <p>Платежная база определяется для каждого стационарного источника, фактически использовавшегося в отчетный период, в отношении каждого ЗВ, включенного в Перечень.</p>
<p>Письмо Росприроднадзора, 2022 г.</p>	<p>Для информирования плана-графика наблюдений, могут использоваться подходы, аналогичные подходам к формированию программ государственной наблюдательной сети и территориальных систем наблюдений.</p> <p>Перечень наблюдаемых ЗВ в программах наблюдений должен определяться по результатам анализа данных о потенциальных источниках их поступлений и переноса в окружающей среде на территорию (акваторию) размещения пункта наблюдений, с учетом возможной их трансформации в окружающей среде, а также с учетом Перечня.</p>

В перечне появятся 68 новых веществ для атмосферного воздуха, в т.ч. 13 приоритетных загрязняющих веществ. Принятие перечня требует пересмотре действующей природоохранной документации и расширения списков учитываемых, нормируемых и контролируемых загрязняющих веществ, а также платежной базы, что не соответствует законодательству.

Технологические нормативы выбросов разрабатываются на объектах ОНВ I категории и в отношении выбросов маркерных веществ. Устанавливаются согласно КЭР и на основе технологических показателей, не превышающих ТП НДТ.

Соблюдение технологических нормативов не должно обеспечивать соблюдение нормативов качества окружающей среды.

В План-график контроля должны включаться загрязняющие вещества, в том числе маркерные, которые присутствуют в выбросах стационарных источников и в отношении которых установлены ТН, НДС (ПДВ), ВРВ (лимиты на выбросы) с указанием используемых методов контроля (расчетные и инструментальные) показателей загрязняющих веществ в выбросах стационарных источников, а также периодичность проведения контроля (расчетными и инструментальными методами контроля) в отношении каждого стационарного источника выбросов и выбрасываемого им загрязняющего вещества.

Программа содержит план-график проведения наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха, только, если объект включен в Перечень объектов, владельцы которых должны осуществлять мониторинг атмосферного воздуха.

Поэтому выстроить прогностическую модель, которая бы непрерывно указывала на существующие загрязнения достаточно сложно на основе нормативно правовой базы, которая предоставляется в органы Росприроднадзора от всех природопользователей, что ещё раз говорит о необходимости формирования более адекватной прогностической модели для

субъектов на основе экспериментальных данных и для каждого субъекта отдельно.

### 1.3 Анализ качества атмосферного воздуха на территории РФ

«Загрязнение воздуха считается одной из крупнейших в мире экологических угроз здоровью, на долю которой приходится около 7 млн смертей во всем мире ежегодно. Загрязнение воздуха вызывает и усугубляет многие заболевания, начиная от астмы и заканчивая раком, болезнями легких и сердечными заболеваниями.

В 2021 году в России зафиксировано 406 случаев загрязнения воздуха, что на 23% больше, чем годом ранее. Такие данные аналитики Fin Expertiza (сеть профессиональных аудиторских, оценочных и консалтинговых компаний) обнародовали 7 февраля 2022 года. В своей работе они использовали расчеты Росгидромета [23].

Второй год подряд число выявленных загрязнений демонстрирует рекордные значения - теперь уже как минимум за последние 17 лет (рисунок 3). С 2011 года количество случаев высокого и экстремально высокого загрязнения выросло в шесть раз» [22].



Рисунок 3 – Динамика числа загрязнений воздуха в России

«Чаще всего от масштабных выбросов в атмосферу страдают Красноярский край, Самарская, Оренбургская и Иркутская области, а также Бурятия.

За 2021 год в России было зафиксировано 369 случаев высокого и 37 случаев экстремально высокого загрязнения атмосферного воздуха, следует из оперативных данных Росгидромета. Это на 75 случаев, или на 23%, больше, чем в 2020 году. Тогда, несмотря на локдаун и спад экономической активности, был установлен многолетний антирекорд по числу загрязнений - 331 инцидент» [11].

«Под высоким загрязнением понимается содержание в атмосферном воздухе одного или нескольких веществ, превышающее предельно допустимую концентрацию в 10 и более раз. Под экстремально высоким загрязнением понимается превышение предельно допустимой концентрации веществ в 20-29 раз при сохранении этого уровня более двух суток, либо в 30-49 раз при сохранении этого уровня от восьми часов и более, либо в 50 и более раз при разовом превышении.

Экстремально высокое загрязнение сочетается с визуальными и органолептическими признаками, такими как появление устойчивого, несвойственного данной местности и сезону запаха, резкое воздействие воздуха на органы чувств человека, выпадение подкрашенных дождей и других атмосферных осадков, появление осадков со специфическим запахом или несвойственным привкусом. Высокие и экстремально высокие загрязнения могут нанести существенный вред окружающей среде и здоровью человека» [11].

«Также в течение 2021 года было зафиксировано 25 случаев аварийных загрязнений, что в два раза больше, чем годом ранее. Причинами данных инцидентов в основном являлись возгорания, разгерметизация или выбросы в результате неисправности оборудования на производственно-складских площадках, а также природные пожары. К счастью, лишь один из этих инцидентов привел к высокому загрязнению воздуха» [12].

По данным на 2022 год В феврале 2022 года Росприроднадзор назвал регионы с самым грязным воздухом. Хуже всего дела обстоят в Красноярском крае из-за высокого уровня выбросов в Норильске. Объем выбросов в атмосферу Красноярском крае составляет 1,8 млн т в год (11% выбросов по России). Рейтинг самых грязных городов России по данным 2022 года представлен на рисунке 4.

Рассмотрим подсистемы экологического мониторинга на примере города Тольятти Самарской области.

Подсистемами экологического мониторинга являются: мониторинг атмосферного воздуха, мониторинг промышленных выбросов, мониторинг поверхностных вод, мониторинг зеленых насаждений, мониторинг состояния почвы, мониторинг шумового загрязнения, мониторинг радиационного излучения, мониторинг электромагнитного излучения.



Рисунок 4 – Загрязненные города России по индексу AQI (индексу качество воздуха)

Системы мониторинга атмосферного воздуха г.о Тольятти:

- посты наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха (8 постов);
- передвижная экологическая лаборатория контроля качества воздуха и шума. (за 2021 год 144 выезда, за 2022 год 145 выездов). Экспресс анализ в режиме реального времени по 25 загрязняющим веществам;
- мониторинг промышленных выбросов.

На рисунках 5 и 6 представлена статистика загрязняющих выбросов в атмосферный воздух веществ от стационарных и передвижных источников на период с 2017 по 2021 год на территории г.о. Тольятти.

В городе Тольятти осуществляется мониторинг качества атмосферного воздуха путем инструментальных измерений на стационарных постах контроля (рисунок 7) [3]. Номер и адрес размещения поста контроля и определяемые загрязняющие вещества приведены в таблице 2.

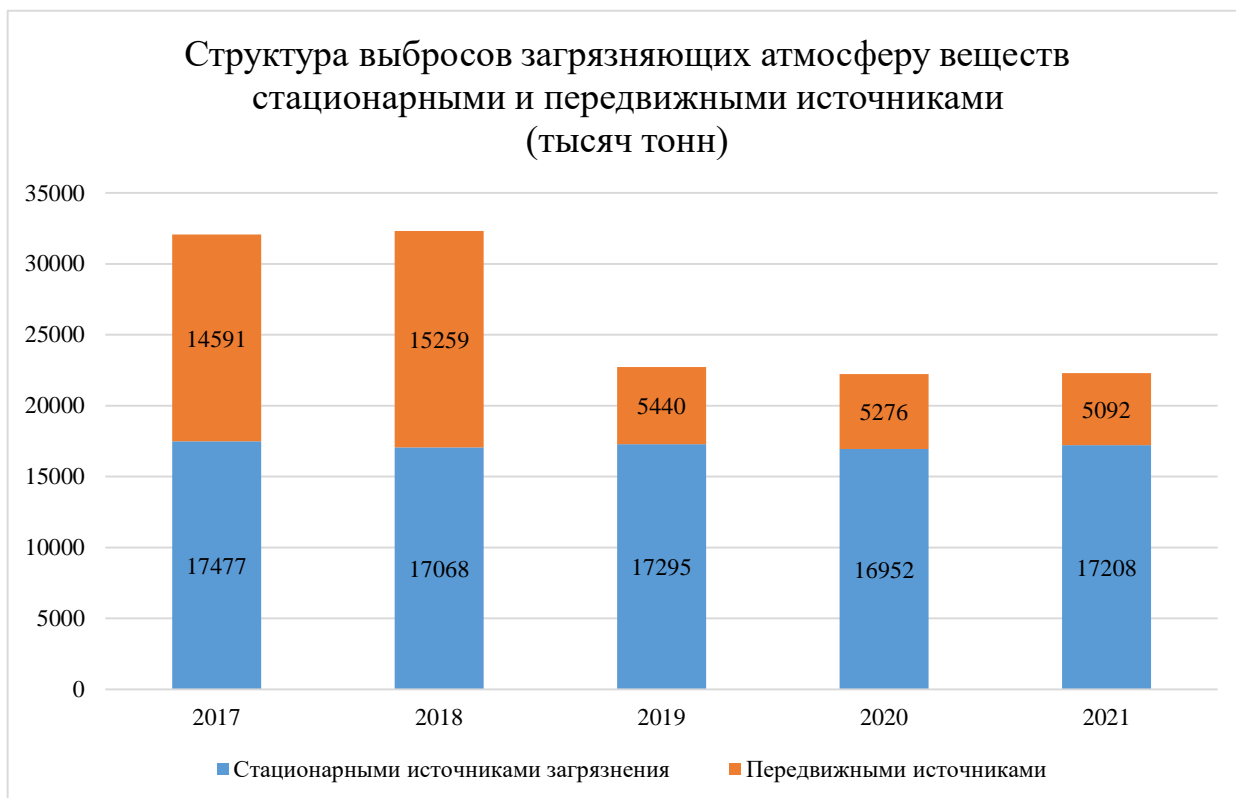


Рисунок 5 – Выбросы загрязняющих атмосферу веществ



Рисунок 6 – Структура выбросов загрязняющих атмосферу веществ стационарными и передвижными источниками (тысяч тонн)

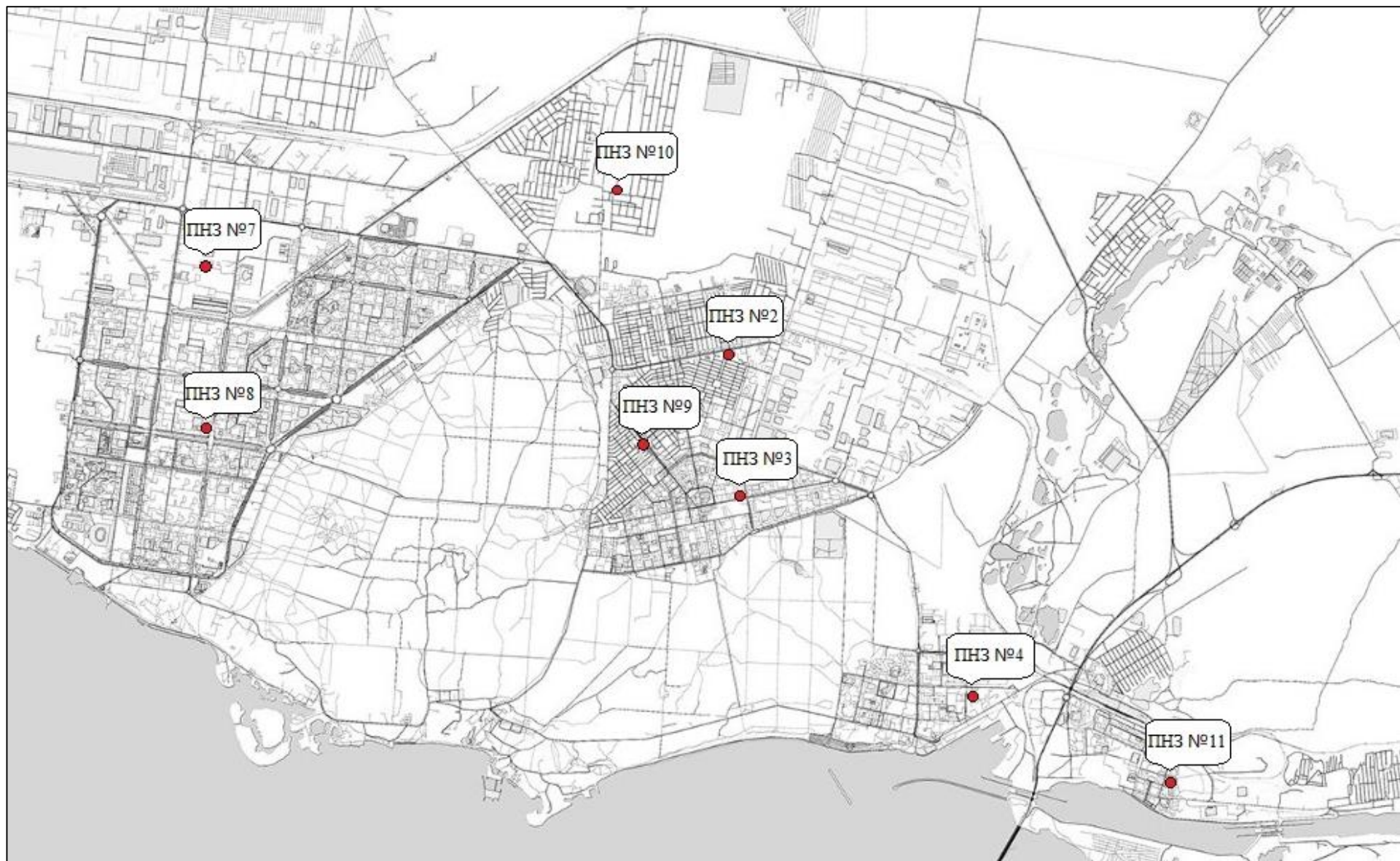


Рисунок 7 – Стационарные посты контроля качества атмосферного воздуха



Таблица 2 – Посты наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха

Город	№ поста	Адрес поста	Определяемые примеси
Тольятти	2	бульвар 50-лет Октября, юго-восточнее д. 65	Азота диоксид, аммиак, бенз(а)пирен, бензол, взвешенные вещества (пыль), водорода фторид, ксилол, серы диоксид, толуол, углеводороды, углерода оксид, этилбензол, тяжелые металлы (железо, кадмий, магний, марганец, медь, никель, свинец, хром, цинк)
	3	улица Мира, восточнее д. 100	Азота диоксид, аммиак, взвешенные вещества (пыль), водорода фторид, серы диоксид, углерода оксид, формальдегид
	4	улица Ярославская, западнее д. 10	Азота диоксид, азота оксид, аммиак, взвешенные вещества (пыль), серы диоксид, углерода оксид, формальдегид
	7	улица Ботаническая, 12	Азота диоксид, аммиак, бенз(а)пирен, взвешенные вещества (пыль), серы диоксид, углерода оксид, формальдегид, тяжелые металлы (железо, кадмий, магний, марганец, медь, никель, свинец, хром, цинк)
	8	проспект Степана Разина, восточнее д. 26	Азота диоксид, азота оксид, аммиак, бенз(а)пирен, бензол, взвешенные вещества (пыль), водорода фторид, ксилол, серы диоксид, толуол, углеводороды, углерода оксид, фенол, формальдегид, этилбензол и тяжелые металлы (железо, кадмий, магний, марганец, медь, никель, свинец, хром, цинк)
	9	улица Карла Маркса, ООТ «Буревестник»,	Азота диоксид, азота оксид, взвешенные вещества (пыль), углерода оксид, формальдегид
	10	село Тимофеевка, ул.Южная, участок 1-Г	Азота диоксид, аммиак, взвешенные вещества (пыль), водорода фторид, углеводороды, углерода оксид, формальдегид
	11	улица Шлюзовая, южнее д. 8	Азота диоксид, аммиак, взвешенные вещества (пыль), водорода фторид, углеводороды, углерода оксид, формальдегид

Данные стационарных постов мониторинга не позволяют давать точные оценки загрязнения, так как стоимость таких устройств не позволяет проводить исследования с большим числом исследуемых загрязнителей и дают лишь косвенные оценки с потерей информации о величинах концентрации.

С 2020 года в Тольятти начала свое функционирование передвижная экологическая лаборатория (рисунок 8), которая осуществляет свою деятельность в тестовом режиме. Маршрут ее следования организован с учетом данных о жалобах населения.



Рисунок 8 – Передвижная экологическая лаборатория

Под контролем экологической лаборатории находится 26 загрязнителей, такие как оксид углерода, оксид азота, диоксид азота, аммиак, диоксид серы, сероводород, взвешенные частицы, взвешенные частицы PM1, взвешенные частицы PM2.5, взвешенные частицы PM4, взвешенные частицы PM10, фенол, бензол, толуол, этилбензол, М,п-ксилол, О-ксилол, стирол, формальдегид, смесь предельных углеводородов  $C_1H_4-C_5H_{12}$ , смесь предельных

углеводородов  $C_6H_{14}-C_{10}H_{22}$ , бутанол, ацетон, метанол, изопропанол и альфаметилстирол.

Введем средние значения загрязнителей в таблицу 3 согласно результатов выездной экологической лаборатории за период с 01.01.2022 по 31.12.2022.

Таблица 3 – Средние значения загрязняющих веществ

Загрязняющее вещество	Результат измерений (среднее значение), мг/м <sup>3</sup>	ПДК загрязняющего вещества, мг/м <sup>3</sup>
Углерода оксид	1,519047619	5
Азота оксид	0,020238095	0,4
Азота диоксид	0,024666667	0,2
Аммиак	0,038647619	0,2
Сера диоксид	0,044890476	0,5
Сероводород	0,004742857	0,008
Взвешенные частицы	0,025619048	0,5
Взвешенные частицы PM1	0,022285714	-
Взвешенные частицы PM2.5	0,022285714	0,16
Взвешенные частицы PM4	0,023238095	-
Взвешенные частицы PM10	0,025190476	0,3
Фенол	0,00047619	0,01
Бензол	0,020380952	0,3
Толуол	0,113380952	0,6
Этилбензол	0,022142857	0,02
М,п-ксилол	0,00052381	0,2
О-ксилол	0,006238095	0,3
Стирол	0,009285714	0,04
Формальдегид	0,000333333	0,05
Смесь предельных углеводородов $C_1H_4-C_5H_{12}$	1,627285714	200
Смесь предельных углеводородов $C_6H_{14}-C_{10}H_{22}$	0,024380952	50
Бутанол	0,001761905	0,1
Ацетон	0,03252381	0,35
Метанол	0,050761905	1
Изопропанол	0,373952381	0,6
Альфаметилстирол	0,003380952	0,04

В период с 01.01.2022 по 31.12.2022 было произведено 145 выездов, при 23 из которых были зафиксированы превышения, данные из таблицы 4.

Все данные располагаются в открытом доступе на сайте администрации г.о. Тольятти, и каждый житель города можешь ознакомиться с показателями качества атмосферного воздуха и результатами выезда передвижной экологической лаборатории.

Таблица 4 – Показатели загрязнителей, превышающие ПДК

Загрязняющее вещество	Дата измерения	Результат измерений, мг/м <sup>3</sup>	ПДК загрязняющего вещества, мг/м <sup>3</sup>
Углерода оксид	11.04.2022	5,4	5
	16.08.2022	6,72	
	17.10.2022	5,9	
Сероводород	16.08.2022	0,0090	0,008
Этилбензол	13.04.2022	0,031	0,02
	09.06.2022	0,025	
	15.06.2022	0,021	
	13.07.2022	0,025	
	13.07.2022	0,025	
	22.07.2022	0,021	
	22.07.2022	0,022	
	26.07.2022	0,021	
	27.07.2022	0,021	
	27.07.2022	0,027	
	04.08.2022	0,026	
	04.08.2022	0,023	
	06.08.2022	0,021	
	08.08.2022	0,024	
12.08.2022	0,106		
Стирол	12.09.2022	0,072	0,04
Изопропанол	03.08.2022	3,734	0,6
	12.08.2022	4,047	

Вывод по главе 1: на основе анализа природоохранного и ресурсного законодательства можно сделать вывод, что требования к перечню загрязняющих веществ и их контролю осложняется некими противоречиями в самой нормативно-правовой базе, тем не менее качество атмосферного воздуха остается основной приоритетной задачей политики правительства в области охраны окружающей среды и здоровье населения.

Анализ существующей системы экологического мониторинга на территории города Тольятти определил перечень загрязняющих веществ и в целом количественный и качественный их состав.

В целом мониторинг данных привел к отсутствию определенной системности в определении постов наблюдения, и их отсутствие в принципе в местах автомагистралей на жилых зонах территории города Тольятти.

Более того, не определено отдельное внимание по отношению к передвижным источникам, поэтому в дальнейшем исследование будет направлено на определение перечня приоритетных загрязняющих веществ от передвижных источников автомагистралей селитебных территорий вблизи жилых застроек и анализу физических факторов, которые способствуют их распространению.

## **Глава 2 Анализ существующих математических моделей, используемых для описания пространственного распределения загрязнителей атмосферного воздуха (промышленных выбросов и выбросов автотранспорта)**

### **2.1 Сравнительный анализ математических моделей**

«Для построения карты загрязнения территории и оценки токсической экспозиции для населения необходимы модели, которые в дальнейшем позволят исследовать влияние загрязнения атмосферного воздуха на качество окружающей среды и здоровье населения.

При прогнозировании качества атмосферного воздуха используется множество методик, которые подразделяются на три категории – климатологические, статистические и трехмерные.

Климатологические модели основаны на взаимосвязи повышенных уровней загрязнения с определенными метеорологическими условиями, такими как химическая трансформация примесей, радиоактивный распад и накопление дочерних продуктов, дожди или снег, вымывание, туман, сухое осаждение» [15].

Также при построении модели необходимо учитывать характеристики состояния атмосферы – температуру атмосферного воздуха, колебания направления ветра, инсоляцию, облачность и скорость ветра.

«Важнейшим параметром, определяющим масштабы распространения примесей, является время их существования в атмосфере. Время «жизни» рассчитывается как отношение общего количества данного вещества в среде к его поступлению в эту среду. Эта величина зависит как от свойств вещества, так и от свойств самой «принимающей» среды, то есть она характеризует возможную скорость самоочищения среды и концентрацию в состоянии стационарного равновесия, когда скорость самоочищения и скорость поступления вещества извне равны.

Параметр времени «жизни» является интегральным показателем дисперсии загрязняющих веществ в геосредах. Исходя из значений данного параметра, все выбросы подразделяются с учетом вероятности их распространения на различные расстояния.

1. Приводящие к загрязнению в глобальном масштабе – вещества с большим временем жизни (годы, месяцы), распространяющиеся повсеместно независимо от места выброса. К ним относятся углекислый газ, фреоны, радионуклиды с периодом полураспада от одного месяца и более. При ядерных взрывах и авариях период полураспада принимается от нескольких дней.

2. Приводящие к загрязнению в региональном масштабе – время жизни которых от нескольких суток. Такие загрязнители (иногда в следовых количествах) наблюдаются повсеместно. К ним относятся оксиды серы и азота (могут быть и природного генезиса), пестициды и тяжелые металлы.

3. Приводящие к загрязнению в локальном масштабе – вещества с малым периодом «жизни». К ним отнесены грубозернистые аэрозоли, сероводород и др. Это также могут быть загрязнители, выбрасываемые из низких источников, в том числе оксиды серы и азота.

С учетом времени «жизни» продуктов деструкции, физических и химических свойств загрязняющих веществ, их токсичности, плотности выпадения формируются программы мониторинга и осуществляется нормирование выбросов веществ в атмосферу» [14].

В таблице 5 приведены виды моделей, используемые для описания поведения примесей в атмосфере.

Таблица 5 – Виды моделей для определения загрязнителей в атмосферном воздухе

Вид модели	Характеристика	Примечания
Классификации и дерево регресса (CART)	Использование тех переменных, которые наиболее тесно связаны с уровнями загрязнения окружающей среды	-
Регрессионный анализ	Взаимосвязь между уровнем загрязнения и метеорологическими переменными, которая определяется количественно	Результирующее множественное линейное регрессионное уравнение может использоваться для прогнозирования уровней загрязнения
Искусственные нейронные сети (распознавание образов)	Анализ ретроспективных данных, чтобы идентифицировать атмосферные параметры, которые влияют на качество воздуха и количественно оценить это влияние с помощью приложений, использующих такой метод адаптивного обучения и распознавания образов, как нейронные сети	Являются более сложными, чем климатические, но достаточно просты в реализации и использовании, требуют небольших вычислительных ресурсов и незначительных специальных знаний
Трехмерные (3 -D) модели	Модели состояния воздуха стремятся математически представить все важнейшие процессы, влияющие на уровень загрязнения окружающей среды	Эти модели фактически состоят из нескольких подмоделей, которые взаимодействуют при моделировании выброса, переноса и преобразования загрязнения воздуха
Модель Гаусса [9]	«В основе данной модели лежит предположение, что загрязнитель будет расходиться в соответствии с нормальным распределением статистики» [9].	Применяется для долгосрочных и краткосрочных прогнозов
Модель Эйлера	Эйлеровы модели, решают уравнение сохранения массы для определенного загрязнителя	Используют фиксированную решетку (вертикальную и горизонтальную) и решают соответствующие химические уравнения одновременно во всех ячейках решетки, при этом учитывая обмен загрязняющими веществами между ячейками
Модель Лагранжа	Описывает перенос отдельных воздушных потоков с течением времени под действием атмосферных полей и распространение примесей загрязняющего вещества	Либо отслеживаются процессы в движущихся массах воздуха, либо используются условные частицы для имитации процессов рассеивания



Продолжение таблицы 5

Вид модели	Характеристика	Примечания
Модель Ханна	Оценка самой высокой концентрации загрязняющего вещества испускаемого от точечного источника по направлению ветра	-
Стохастическая модель	Базирована на полуэмпирических или статистических методах и ориентирован на проведение анализа соотношения между качеством атмосферного воздуха и измерениями атмосферных параметров или на прогнозировании случаев повышенного загрязнения воздуха	-
Рецепторная модель	Алгоритм рецепторной модели рассматривает измеренные концентрации загрязнителей в рецепторной точке и оценивает процентный вклад различных источников в эту концентрацию.	-
Штатные модели служб гражданской обороны (ГО)	Стандартная методика основана на эмпирических моделях и позволяет определить максимально возможную зону поражения при выбросах ядовитых веществ. Результат моделирования — не реальное положение облака выбросов в тот или иной момент времени, а границы, в пределах которых концентрация ядовитых веществ может достичь опасных для здоровья человека значений при неблагоприятных метеоусловиях.	Простота и быстрота расчетов. Модель реализована в программном комплексе «ТОКСИ» (НТЦ «Промбезопасность»)
Стандартные модели загрязнения атмосферы стационарными источниками, основанные на модели ОНД-86	Модели могут использоваться для анализа квазистационарных процессов, когда характерные времена выбросов токсичных веществ превышают характерные периоды перемещения воздушных масс в экспортируемой области пространства (например, случаи пожаров или утечек на продуктопроводах). Модель эмпирическая и позволяет рассчитать установившееся распределение концентраций токсиканта при заданном ветре и максимально неблагоприятном с точки зрения рассеяния примесей состоянии атмосферы.	Модель реализована в программных комплексах НПП «Логус», НИИ «Атмосфера», ПК «Роса» и др. Является базовой для разработки систем производственного экологического мониторинга и классификации источников загрязнения атмосферы по степени опасности выбросов

Продолжение таблицы 5

Вид модели	Характеристика	Примечания
Модели МАГАТЭ (международный стандарт)	Предназначены для расчетов загрязнений атмосферы, создаваемых стационарными источниками примесей. Наиболее полные из существующих в настоящее время эмпирических моделей. Характер их детализации позволяет учитывать особенности местных метеорологических условий и производить расчеты распределений концентрации примесей в текущих метеоусловиях. Модели требуют значительных работ, но привязке к местным условиям. Время вычислений сопоставимо с вычислениями по модели ОНД—86	-
Простейшие нестационарные модели для расчета распространения облака загрязняющих веществ	Предназначены для экспресс-прогноза. Строятся на основе методик и моделей МАГАТЭ и позволяют рассчитать траекторию и время движения облака выбросов до потери токсичности или в интересующей области в текущих метеоусловиях. Установившихся стандартов на такие модели нет	-
Нестационарные модели загрязнения, учитывающие неоднородность подстилающей поверхности	Квазитрехмерные модели, основанные на использовании полуэмпирических моделей МАГАТЭ с решением уравнения переноса — диффузии примесей в приземном слое. Для повышения скорости и точности вычислений использованы высокоэффективные численные методы и учтена специфика решаемой задачи [28]	Используются в случаях, когда необходимо учесть неоднородность подстилающей поверхности, а вычислительные ресурсы и (или) недостаток информации
Блок моделей, учитывающих процессы химической трансформации примесей	Используется в тех случаях, когда для анализа события существенным является учет химических реакций, протекающих в облаке выбросов, например, в случаях возможности значительного повышения или уменьшения токсичности. Подключение блока может значительно (в несколько раз) замедлить время работы расчетной модели	-

Продолжение таблицы 5

Вид модели	Характеристика	Примечания
<p>Специальные модели для районирования территорий по вероятности аварий и степени угрозы промышленным объектам и населению</p>	<p>Основаны на среднестатистических моделях с использованием информации о розе ветров данной местности. Необходим учет реакции объекта (человека, промышленного предприятия), подвергающегося воздействию облака выбросов. Характер реакции объекта зависит от его свойств, типа и концентрации токсичного вещества и продолжительности его воздействия. Данные модели строятся на основе моделей 1—6. Выбор модели определяется характером необходимой оценки. Так, для оценки влияния на здоровье населения в случае выброса ядовитых газов можно использовать модель 1, в случае безвредных примесей вообще не требуется расчетов, а промежуточные случаи как всегда сложны для моделирования</p>	<p>-</p>
<p>Комплекс синоптико-статистических моделей и автоматизированного прогнозирования неблагоприятных метеоусловий (НМУ)</p>	<p>Предназначены для оценки и прогнозирования уровней загрязнения атмосферного воздуха, а также принятия решения по атмосфероохранной деятельности.</p> <p>Для получения методик с высоким качеством прогнозирования необходимы исследования по диагностике погодных процессов синоптического масштаба, приводящих к реализации НМУ. На основе этих исследований создают классификации синоптических процессов.</p> <p>Разработка расчетных моделей на базе многомерного статистического аппарата. Построение прогностических зависимостей основано на теории решения некорректных задач — это позволяет получать устойчивые решения при наличии коррелированных<sup>TM</sup> параметров, описывающих синоптическую ситуацию. Прогностическая система включает: прием и обработку метеорологической информации из каналов связи, контроль и корректировку данных, архивирование и собственно прогноз [8]</p>	<p>-</p>

Объектом исследования является процесс рассеивания загрязняющих веществ от выбросов автотранспорта в атмосферный воздух. Для контроля качества атмосферного воздуха и нормирования выбросов необходимо подобрать метод расчета, который адекватно описывал действительное распределение загрязняющего вещества в атмосфере.

Проанализировав все вышеуказанные виды моделей, можем сделать вывод, что наиболее простым и эффективным является регрессионный анализ, основанный на влиянии одной или нескольких независимых переменных на зависимую переменную. Ранее данная модель к процессу рассеивания загрязняющих веществ не применялась. Независимые переменные называются регрессорами или предикторами, а зависимые переменные – критериальными или регрессантами. На основе предикторов составляется прогноз, к ним относятся как метеорологические факторы, так и инерционный фактор, основанный на загрязнении воздуха накануне того дня на который составляется прогноз.

Если связь между прогнозируемым параметром и предиктором линейна, то рассчитывают коэффициент линейной корреляции.

Приближенное определение значимости предиктора – на основе графического рассмотрения связи между ним и прогнозируемым параметром.

Предиктор значим, если зависимость выражена четко и соответствует физическим представлениям о процессе распространения примесей.

Далее необходимо обосновать выбор предикторов, исходя из объекта исследования – придвижные источники на автомагистралях селитебных территории.

## **2.2 Анализ необходимых входных критериев для расчета (идентификации моделей)**

Помимо вреда от выбросов промышленных предприятий, атмосферный воздух ежесекундно загрязняется выбросами, образующимися от транспорта.

Большое количество автомагистралей, крупных морских и воздушных портов, а также железных дорог строилось без внимания и даже без учета ущерба окружающей среде.

«Загрязняющие вещества, образующиеся на транспорте, в основном состоят из газов, выбрасываемых из выхлопных систем автомобилей, поездов и судов. Они перемещаются по воздуху. Это оксиды азота, диоксид серы, диоксид углерода, металлы, а также органические соединения (летучие, в том числе некоторые токсичные, стойкие, биологически накопленные)» [10].

В городах на качество воздуха огромное влияние имеет организация автомобильного движения и технического состояния транспортных средств. Нерациональная организация движения приводит к многочасовым пробкам, в результате которых в атмосферный воздух попадание окиси углерода, окислов азота, углеводородов, соединений свинца и сажи увеличивается.

«В присутствии оксидов азота и углеводородов под действием солнечной радиации образуется вторичный загрязнитель с сильно окисляющими свойствами – озон. Летом, при высокой температуре воздуха и длительном пребывании на солнце в течение нескольких дней, концентрация озона может достигать значений, характерных для летнего смога. Шоссе и дороги, построенные человеком, вносят необратимые изменения в окружающую среду» [10].

В таблице 6 представлен химический состав выхлопных газов автомобилей.

Таблица 6 – Химический состав выхлопных газов автомобиля

Компонент	Объемная доля в бензиновом двигателе, %	Объемная доля в дизельном двигателе, %	Токсичность
Азот N <sub>2</sub>	74–77	76–78	нетоксичен
Кислород O <sub>2</sub>	0,3–8	2–18	нетоксичен
Водород H <sub>2</sub>	0 – 5,0	-	нетоксичен
Водяной пар H <sub>2</sub> O	3–5,5	0,5–4	нетоксичен
Диоксид углерода CO <sub>2</sub>	5–12	1–10	нетоксичен

Продолжение таблицы 6

Компонент	Объемная доля в бензиновом двигателе, %	Объемная доля в дизельном двигателе, %	Токсичность
Оксид углерода (СО – угарный газ)	0,5–12	0,01–5	токсичен
Углеводороды $C_xH_y$	0,2–3	0,009–0,5	токсичны
Альдегиды	0–2	0,001–0,009	токсичны
Диоксид серы $SO_2$	0–0,002	0–0,03	токсичен
Сажа, $г/м^3$	0–0,04	0,1–1,1	канцерогены
Бензапирен, $г/м^3$	0,01–0,02	0–0,01	канцерогены

«Наибольшее количество загрязняющих веществ выбрасывается при разгоне автомобиля, так как в этот момент двигатель потребляет наибольшее количество топлива, а значит в этот момент выбросы выхлопных газов наиболее интенсивны. Относительная доля углеводородов и оксида углерода от общей массы выбросов наиболее высока при торможении и на холостом ходу» [7].

Оксид углерода является наиболее распространённым загрязнителем. Высокие концентрации оксида углерода при попадании в организм человека снижают количество кислорода в организме, который может переноситься в кровотоке к таким критическим органам, как сердце и мозг. Естественный уровень содержания оксида углерода в атмосферном воздухе – 0,01-0,9  $мг/м^3$ .

«На рисунке 9 показана зависимость выброса окиси углерода легковым автомобилем от скорости его движения» [7].

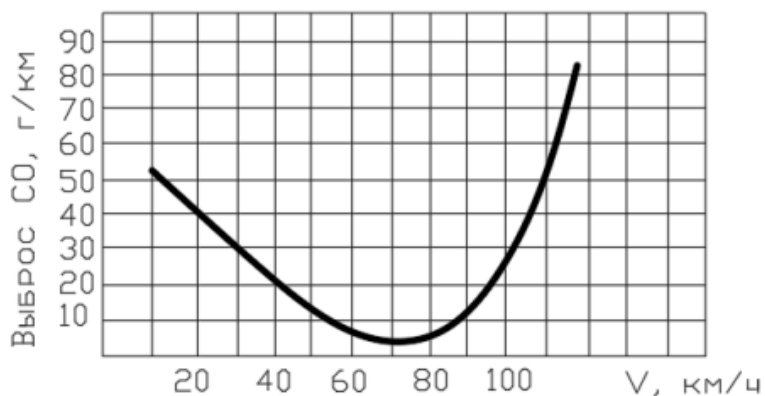


Рисунок 9 - Зависимость выброса окиси углерода в атмосферу от скорости движения легкового автомобиля

«Как видно из рисунка 9 наименьший выброс наблюдается при скорости движения 70 км/ч. Поэтому эта скорость не только наиболее безопасна для движения, но также не причиняет особого вреда атмосфере» [7].

### **2.3 Обоснование выбора предикторов для расчета**

Предикторы являются прогностическими параметрами, то есть используя предиктор в расчете мы будем понимать, как та или иная переменная будет влиять на рассеивание загрязнителя в атмосферном воздухе.

Приближенное определение значимости предиктора – на основе графического рассмотрения связи между ним и прогнозируемым параметром.

Предиктор значим, если зависимость выражена четко и соответствует физическим представлениям о процессе распространения примесей.

«При расчете модели загрязнения атмосферного воздуха от автотранспорта можно использовать следующие предикторы:

- предикторы на основе данных о дорогах, например, расстояние от точки наблюдения до ближайшего шоссе; плотность дорог всех типов внутри круговой буферной зоны с различными радиусами от 100 до 1000 м; общая длина шоссе внутри круговых буферных зон с радиусами от 100 до 1000 м; общая длина главных дорог города внутри круговых буферных зон с радиусами от 100 до 1000 м;

- предикторы на основе данных об интенсивности трафика, например, интенсивность движения всех автомобилей внутри круговых буферных зон с радиусами от 100 до 1000 м; интенсивность движения дизельных автомобилей внутри круговых буферных зон с радиусами от 100 до 1000 м» [29];

- предикторы на основе географических данных, например, X и Y координаты (в проекции UTM); высота над уровнем моря; расстояние до океана;

– предикторы на основе данных о типах землепользования (например, площадь земли для коммерческой застройки внутри круговых буферных зон с радиусами от 300 до 1000 м; площадь земли для жилищной застройки; площадь земли для промышленной застройки; площадь открытой земли, парков или водоемов).

Современные технологии ГИС позволяют без труда получить множество переменных с любыми размерами буферных зон. Выбор размеров должен быть основан на информации о вероятном рассеянии загрязнения и предположениях о влиянии на него изучаемых предикторов [1].

«Рассмотрим выбор размеров буферных зон для переменных «плотность дорог». Во многих исследованиях было показано, что концентрация связанных с автотранспортом загрязнителей убывает экспоненциально с расстоянием от дорог. Считается, что влияние дорог на концентрацию ограничено расстоянием около 100м от основных городских дорог и около 500м от загородных шоссе. В центральной части города здания могут стать причиной нарушения простого экспоненциального убывания концентрации с расстоянием. Например, в каньонах улиц может возникнуть накопление загрязнения. Также концентрации на одной стороне дороги могут значительно отличаться от концентрации с другой стороны, например, за счет открытого пространства с одной из сторон улиц. Уровень загрязнения позади непрерывного ряда зданий может быть даже на фоновом уровне. При этом формирование  $\text{NO}_2$  в таких местах может быть ограничено недостатком свободного кислорода, в результате чего большая часть загрязнения останется в форме  $\text{NO}$ . Таким образом, для буферных зон необходимо обязательно использовать радиусы 50м – 200м, а для загруженных дорог и шоссе от 50м до 500 м» [31].

«Существенной особенностью крупных городов с населением более 500 тыс. человек является то, что с увеличением территории города и численности его населения, в них неуклонно возрастает пространственная дифференциация загрязнений в различных районах. Наряду с невысокими уровнями



концентраций загрязнения в периферийных районах, она резко увеличивается в зонах крупных промышленных предприятий и, в особенности в центральных районах. В-последних, несмотря на отсутствие в них крупных промышленных предприятий, как правило, всегда наблюдаются повышенные концентрации загрязняющих веществ. Это вызывается как тем, что в этих районах наблюдается интенсивное движение автотранспорта, так и тем, что температура атмосферного воздуха в них на несколько градусов выше, чем в периферийных. Это приводит к появлению над центрами городов восходящих воздушных потоков, засасывающих загрязненный воздух из промышленных районов, расположенных на ближней периферии» [27].

«Метеоусловия оказывают существенное влияние на перенос и рассеивание примесей в атмосфере. Наибольшее влияние оказывает режим ветра и температуры (температурная стратификация), осадки, туманы, солнечная радиация.

Ветер может оказывать различное влияние на процесс рассеивания примесей в зависимости от типа источника и характеристики выбросов. Если отходящие газы перегреты относительно окружающего воздуха, то они обладают начальной высотой подъема. В связи с этим вблизи источника создается поле вертикальных скоростей, способствующих подъему факела и уносу примесей вверх. Этот подъем обуславливает уменьшение концентраций примесей у земли. Эта концентрация убывает и при очень сильных ветрах, однако это происходит за счет быстрого переноса примесей в горизонтальном направлении. В результате наибольшие концентрации примесей в приземном слое формируются при некоторой скорости, которую называют «опасная» [30].

При низких или холодных источниках выбросов повышенный уровень загрязнения воздуха наблюдается при слабых ветрах ( $w = 0-1$  м/с) вследствие скопления примесей в приземном слое. Прямое влияние на загрязнение воздуха в городе оказывает направление ветра. Существенное увеличение

концентрации примеси наблюдается тогда, когда преобладают ветры со стороны промышленных объектов.

«Если температура окружающего воздуха понижается с высотой, нагретые струи воздуха поднимаются вверх (конвекция), а взамен их опускаются холодные. Такие условия называются конвективными.

Если вертикальный градиент температуры будет отрицательным (температура возрастает с высотой), то вертикально поднимающийся поток становится холоднее окружающих масс и его движение затухает. Такие условия называются инверсионными.

Если повышение температуры начинается непосредственно от поверхности земли, инверсию называют приземной, если же с некоторой высоты над поверхностью земли – приподнятой. Инверсии затрудняют вертикальный воздухообмен и рассеивание примесей в атмосфере.

Для состояния атмосферы в городах наибольшую опасность представляет приземная инверсия в сочетании со слабыми ветрами, т.е. ситуация «застоя воздуха» [2].

Туманы на содержание загрязняющих веществ в атмосфере влияют следующим образом. Капли тумана поглощают примесь, причем не только вблизи подстилающей поверхности, но и из вышележащих, наиболее загрязненных слоев воздуха. Вследствие этого концентрация примесей сильно возрастает в слое тумана и уменьшается над ним. Растворение сернистого газа в каплях тумана приводит к образованию серной кислоты.

Осадки очищают воздух от примесей. После длительных интенсивных осадков высокие концентрации примесей в атмосфере практически не наблюдаются.

Солнечная радиация обуславливает фотохимические реакции в атмосфере с образованием различных вторичных продуктов, обладающих часто более токсичными свойствами, чем вещества, поступающие от источников выбросов. Таким образом, происходит окисление сернистого газа с образованием сульфатных аэрозолей.

В крупных городах формируется свой микроклимат, существенно меняются аэродинамические, радиационные, термические и влажностные характеристики атмосферы. Выделение в городах большого количества тепла, изменение газового и аэрозольного состава воздуха приводят к повышению температуры воздуха и образованию так называемых "островов тепла". Повышение температуры над крупным городом по сравнению с температурой окружающей местности может наблюдаться до высоты в несколько сотен метров.

«Вещества, содержащиеся в промышленных выбросах, могут улетучиться в космическое пространство, а могут осесть на поверхность земли или вымыться из атмосферы осадками» [4]. На процесс переноса и рассеивания загрязняющих веществ оказывают влияние такие факторы:

- количественный состав отводящего газа, его агрегатное состояние, а также высота трубы и скорость движения в ней выбросов. Эффективность рассеивания можно увеличить, если выбросы выводить с большой скоростью через достаточно высокую трубу. Для этого на предприятиях используют трубы со специальным конфузуром и направляющей насадкой, что позволяет увеличить дальность выходящей струи (факельный способ выброса). Эффективную высоту выброса рассчитывают по специальной формуле, учитывающей высоту трубы от поверхности земли и высоту подъема струи отводимого газа над устьем факельной насадки. На процесс отвода ЗВ начальная скорость и количество газовой смеси в трубе, а также диаметр устья трубы;

- метеорологические условия. Скорость ветра в большей степени оказывает влияние на горизонтальное перемещение ЗВ, а температура воздуха – на вертикальное перемещение. Также значение имеет влажность воздуха и атмосферное давление, поскольку именно они оказывают влияние на основной метеорологический фактор – скорость ветра. Движение выбрасываемых частиц в воздухе происходит благодаря турбулентной диффузии (молекулярная диффузия в данном случае имеет незначительное влияние);

– рельеф местности. Наличие возвышенностей оказывает существенное влияние на формирование микроклимата. В понижениях рельефа могут образовываться плохо проветриваемые зоны (застойные), в которых концентрация загрязняющих веществ будет более высокой;

– особенности расположения производственных строений. Промышленная застройка оказывает влияние на скорость воздушного потока, поскольку такие здания, как правило, осуществляют производственное тепловыделение. К тому же кровли строений в большей степени воспринимают солнечное тепло из-за своей площади. Большое значение имеет и характер самого строения. Воздушный поток по-разному обтекает узкие и широкие здания, образуя аэродинамические тени разного размера, оказывающие влияние на распределение концентраций ЗВ.

Если принимать все эти факторы во внимание, то можно контролировать концентрации ЗВ в нижнем слое атмосферы.

На рассеивание ЗВ в атмосферный воздух так же влияет высота источника выброса. Как уже упоминалось выше, высота трубы оказывает влияние на процесс рассеивания. Если источник выброса невысокий, то степень загрязнения воздушной среды будет выше. Наиболее неблагоприятными условиями для таких труб является приземная инверсия (отклонение от естественного температурного режима непосредственно около земли) и слабый ветер (0-1 м/с).

Опасными условиями для высоких источников являются:

– приподнятая инверсия – повышение температуры воздуха на высоте, соответствующей высоте источника;

– слабый ветер (штилевой слой) ниже источника и сильный ветер на уровне выбросов, превышающий скорость самого выброса.

При таких условиях концентрация ЗВ будет минимальной у самого источника и максимальной на некотором расстоянии, а затем опять постепенно снизится (зона постепенного снижения уровня загрязнения). Загрязнения от высоких источников могут распространяться на расстояние от

5 до 10 километров. Наиболее высокие концентрации ЗВ обнаруживаются в зоне задымления. Размеры этой зоны зависят метеорологических условий и высоты трубы (превышают высоту трубы в 10-40 раз).

Расчеты загрязнений воздуха производят при разработке проектов на строительство или реконструкцию промышленных предприятий. При этом учитываются требования ГОСТ 17.2.3.02-78, СНиП 1.02.01-85 и ОНД-86. При проведении данных расчетов важно установить наибольшие концентрации, которые могут образоваться при неблагоприятных метеорологических условиях для доминирующего вещества в выбросах. Эти значения не должны превышать предельно допустимых концентраций, в противном случае потребуется пересмотреть проект, с целью снижения негативного воздействия на окружающую среду.

В таблицу 7 сведены предикторы, использующиеся при составлении прогностической модели рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе от передвижных источников загрязнения.

Таблица 7 – Перечень предикторов для создаваемой модели

Наименование предиктора	Диапазон	Обоснование
Температура воздуха	от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$	Средняя температура января $-10,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , средняя температура июля $+20,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовая температура $+5,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Разница между температурой в городе и на прилегающих территориях в среднем составляет $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ летом и $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ зимой.
Скорость ветра	от 3,2 до 4,6 м/с	Среднегодовая повторяемость штилей составляет 13 %, ветров до 1 м/сек. — 27 %, а повторяемость ветров в 7 м/с и выше составляет 5 %.
Относительная влажность	от 55% до 80%	80-85 % зимой и 55-70 % в тёплый период.
Высота заграждений	0,1-48 м	Заграждениями могут являться как бордюры, так и другие постройки.
Интенсивность дорог	100-530 авт/час	В интенсивность дорог так же входят: количество легковых и грузовых транспортных средств, скорость автотранспорта, вид топлива и т.д.
Расстояние от шоссе до ближайшей жилой застройки	50-400 м	-

На основе данных из таблицы 7 будет рассчитана прогностическая модель рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.

#### **2.4 Анализ экспериментальных данных на территории городского округа Тольятти**

Городской округ Тольятти является центром автомобильной и химической промышленности. На территории города расположены такие крупные предприятия, как АО «АвтоВАЗ», ПАО «КуйбышевАзот», ПАО «Тольяттиазот», ООО «Тольяттикаучук» и многие другие.

В Тольятти умеренно континентальный. Значительно влияют на климат особенности планировки города, состоящего из обособленных районов, разделённых лесными массивами.

Роза ветров города характеризуется следующим образом:

- в холодный период года преобладают ветра южного и юго-западного направления;
- в тёплый – западного и северо-западного.

Среднегодовая скорость ветра около 3,9 м/с. Среднемесячные скорости ветра изменяются от 3,2-3,5 м/с (июнь – август) до 4,6 м/с (октябрь). Среднегодовая повторяемость штилей составляет 13 %, ветров до 1 м/сек. — 27 %, а повторяемость ветров в 7 м/с и выше составляет 5 %.

Площадь лесных насаждений города занимает 7979 га, при этом площадь лесных земель на территории Тольяттинского лесничества составляет 6977,7 га, площадь нелесных земель 1001,3 га (согласно данным 2019 года).

При составе населения 685619 человек, количество транспорта составляет приблизительно четыреста тысяч автомобилей (с учетом семей, имеющих два автомобиля, грузовых и маршрутных транспортных средств). Так же в городе выделены улицы, наполненность которых максимальна не зависимо от времени суток (рисунок 10).

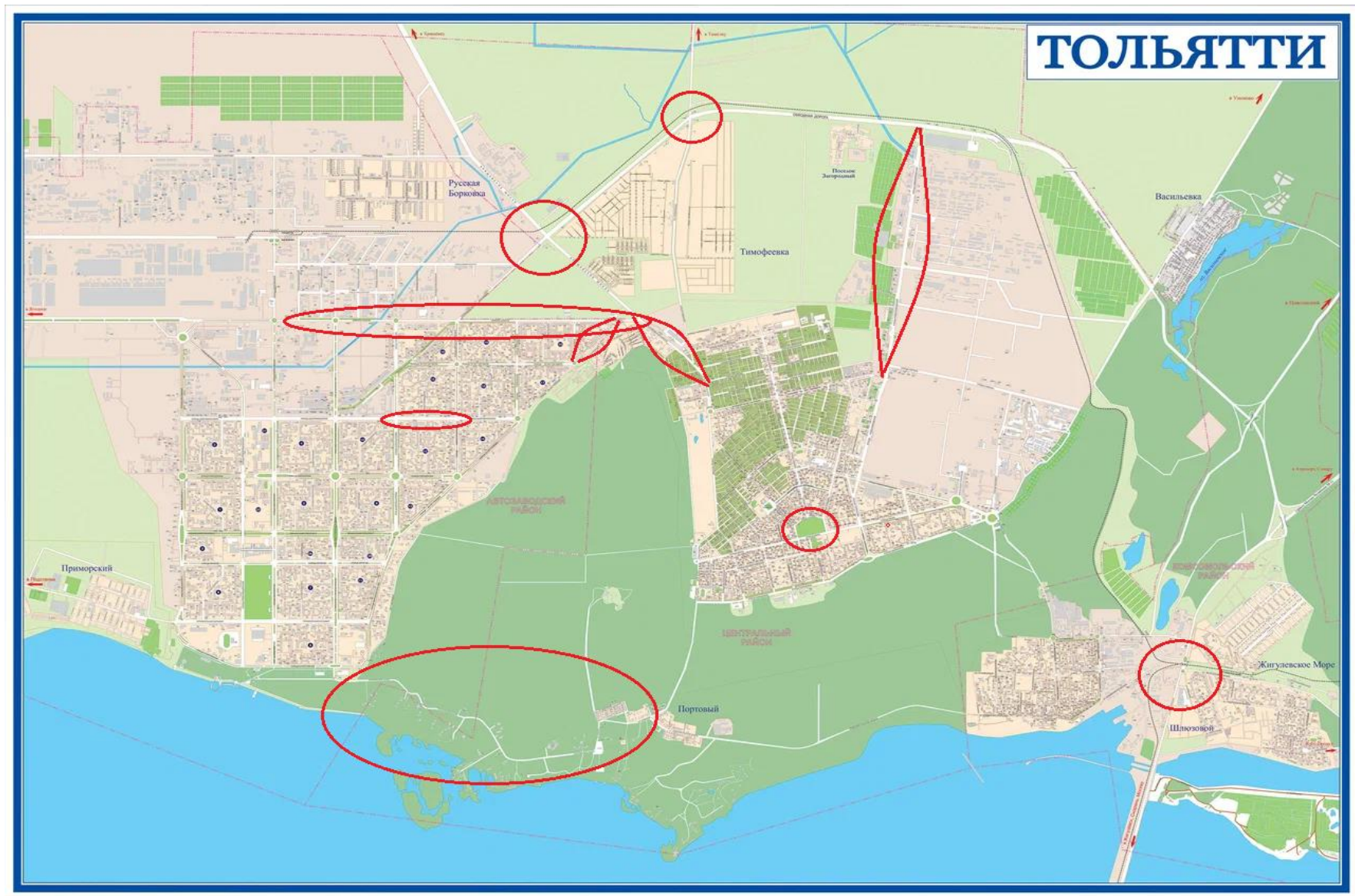


Рисунок 10 – Улицы с наибольшей загруженностью движения

Как видно из рисунка 10, наибольший ущерб от автомобилей приходится на дома, стоящие на центральных улицах, так как они полностью открыты и лесные насаждения там минимальны.

Вывод по главе 2: проведен анализ существующих моделей по распространению загрязняющих веществ и возможного их использования для формирования прогностической модели с целью оценки качества атмосферного воздуха. Анализ проведен с учетом возможности их использования именно от передвижных источников выбросов и с учетом не только метеорологических, но и физических факторов.

Обоснован выбор регрессионного анализа для формирования прогностической модели загрязнения атмосферного воздуха от передвижных источников автомагистралей жилых территорий, а также обоснован выбор предикторов (температура воздуха, скорость ветра, высота заграждений, интенсивность автомобилей, влажность воздуха, расстояние), которые будут входить в данную прогностическую модель и определена территория для формирования непосредственно прогностической модели.



### Глава 3 Разработка прогностической модели для оценки качества атмосферного воздуха от выбросов автотранспорта и промышленных предприятий для г.о. Тольятти

При составлении регрессионной модели загрязнения необходимо учесть параметры, влияющие на распространение загрязняющего вещества. В расчете используются минимальное и максимальное значения переменных.

Так как город Тольятти является «автомобильным» городом, то при расчете были выбраны следующие параметры, внесенные в таблицу 8.

Таблица 8 – Расчетные данные

Исходные данные						
	T (температура воздуха, °C) x1	V (скорость ветра, м/с) x2	φ (влажность воздуха) x3	H (высота загрязнени й, м) x4	S (расстояние, м) x5	I (интенсивн ость автомобиле й) x6
min	-26	3,2	55	0,1	50	100
max	35	4,6	85	48	400	530

Уравнение регрессии имеет следующий вид (1):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{15}x_1x_5 + b_{16}x_1x_6 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{25}x_2x_5 + b_{26}x_2x_6 + b_{34}x_3x_4 + b_{35}x_3x_5 + b_{36}x_3x_6 + b_{45}x_4x_5 + b_{46}x_4x_6 + b_{56}x_5x_6 \quad (1)$$

где  $y$  – выходная переменная (в нашем случае концентрация оксида углерода);

$x_1$  – температура воздуха, °C;

$x_2$  – скорость ветра, м/с;

$x_3$  – влажность воздуха;

$x_4$  – высота загрязнений, м;

$x_5$  – расстояние от дороги, м;  
 $x_6$  – интенсивность автомобилей.

Для получения математического описания процесса был реализован полный факторный эксперимент (ПФЭ).

Количество экспериментальных точек будет равно  $N$  и находится по формуле (2):

$$N = l^n \quad (2)$$

где  $l$  – число уровней, на которых варьируется фактор;

$n$  – число факторов.

Подставим данные в формулу (2) и получим количество экспериментальных точек.

$$N = 2^6 = 64$$

Число параллельных опытов равно трем.

«Все расчеты коэффициентов уравнения регрессии производят в безразмерной системе координат» [5]. Формула перехода от натуральной системы к кодированной имеет следующий вид (3):

$$x_i = \frac{Z_i - Z_i^0}{\Delta Z_i} \quad (3)$$

где  $x_i$  – значение фактора в кодированной системе координат;

$Z_i$  – значение фактора в натуральной системе координат;

$Z_i^0$  – координата центра плана;

$\Delta Z_i$  – интервал варьирования изучаемой переменной.

Значения  $Z_i^0$  и  $\Delta Z_i$  находятся по формулам (4) и (5):

$$Z_i^0 = \frac{Z_i^{max} + Z_i^{min}}{2} \quad (4)$$

$$\Delta Z_i = \frac{Z_i^{max} - Z_i^{min}}{2} \quad (5)$$

где  $Z_i^{max}$  и  $Z_i^{min}$  – граница изучаемой области факторного пространства соответственно максимальное и минимальное значение изучаемого фактора.

За счет ортогональности матрицы планирования коэффициенты уравнения регрессии рассчитываются по формулам (6) – (8):

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (6)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i y_i \quad (7)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i x_j y_i \quad (8)$$

Оценка дисперсии воспроизводимости рассчитывается по формуле (9):

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (y_{\text{эксп}}^u - \Delta y_{\text{эксп}}^u)^2}{m - 1} \quad (9)$$

где  $m$  – количество дополнительных опытов;

$\Delta y_{\text{эксп}}^u$  – среднее значение дополнительных опытов и рассчитывается по формуле (10):

$$\Delta y_{\text{эксп}}^u = \frac{\sum_{u=1}^m y_{\text{эксп}}^u}{m} \quad (10)$$

При переходе к безразмерной системе координат ковариационная матрица получается диагональной, т.е. ковариационные моменты равны нулю и, следовательно, коэффициенты уравнения регрессии взаимно не связаны и рассчитаны с одинаковой точностью. В этом случае значимость коэффициентов уравнения регрессии проверяют в отдельности по критерию Стьюдента (формулы (11) и (12)):

$$t_j = \frac{|b_j|}{S_{bj}} \quad (11)$$

$$S_{bj} = \sqrt{\frac{S_{\text{воспр}}^2}{N}} \quad (12)$$

где  $S_{bj}$  – оценка дисперсии коэффициента уравнения регрессии;

$t_j$  – значение критерия Стьюдента для коэффициента уравнения регрессии.

«Табличное значение критерия Стьюдента для заданного уровня значимости  $p$  и числа степеней свободы  $f=m-1$  выбирают из таблицы значение  $tp(f)$  и если  $t_j > tp(f)$ , то коэффициент значим, а если  $t_j < tp(f)$ , то коэффициент вычеркивается из уравнения регрессии. Зададимся уровнем значимости  $p=0,05$ . Табличное значение критерия Стьюдента для уровня значимости  $p=0,05$  и числа степеней свободы  $f=3-1=2$   $tp(f)=4,3$ . Таким образом, коэффициенты  $b_1, b_2, b_{12}$  незначимы и их следует исключить из уравнения регрессии» [5].

После исключения из уравнения регрессии незначимых коэффициентов проверяют адекватность по критерию Фишера (уравнения (13) и (14)):

$$F = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S_{\text{воспр}}^2} \quad (13)$$

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_{\text{эксп}} - \hat{y}_{\text{эксп}})^2}{N - q} \quad (14)$$

где  $S_{\text{ост}}^2$  – оценка остаточной дисперсии уравнения регрессии;

$\hat{y}_{\text{эксп}}$  - значение  $i$  отклика уравнения регрессии после вычеркивания незначимых коэффициентов;

$q$  - количество коэффициентов в уравнении регрессии после вычеркивание незначимых.

«Уравнение регрессии адекватно, если табулированные значения критерия Фишера  $F_{1-p}(f_1, f_2)$  где  $f_1=N-q$ ,  $f_2=m-1$  больше рассчитанного, т.е.  $F < F_{1-p}(f_1, f_2)$ » [5].

### 3.1 Регрессионный анализ модели рассеивания оксидов азота в атмосферном воздухе

Для оценки дисперсии воспроизводимости произведена серия параллельных опытов [6]. Результаты параллельных экспериментов для оценки воспроизводимости приведем в таблице 9. Результаты расчётов по формулам (9), (10), (12) приведем в таблице 10.

Таблица 9 – Результаты параллельных экспериментов для оценки воспроизводимости

x1	x2	x3	x4	x5	x6	y
0	0	0	0	0	0	0,19
0	0	0	0	0	0	0,19
0	0	0	0	0	0	0,17

Таблица 10 – Результаты оценки воспроизводимости

Уср	S <sub>воспр</sub>	S <sub>b</sub>
0,183333	0,000133	0,001443376

Произведём расчёт коэффициентов уравнения по формулам (6) – (8), определим расчётные значения критериев Стьюдента коэффициентов по формуле (11). Результаты приведём в таблице 11.

Таблица 11 – Значения коэффициентов и критериев Стьюдента

Коэффициент	b0	b1	b2	b3
Значение	0,09297	0,00297	-0,00359375	0,00421875
Критерий	t0	t1	t2	t3
Значение	64,4106	2,05681	2,48982304	2,922835738
Коэффициент	b4	b5	b6	b12
Значение	0,00453125	-0,01203125	-0,00734375	-0,0017
Критерий	t4	t5	t6	t12
Значение	3,139342089	8,335494511	5,087899247	1,1908
Коэффициент	b13	b14	b15	b16
Значение	-0,0039	0,00203	-0,0039	0,00266
Критерий	t13	t14	t15	t16
Значение	2,7063	1,40729	2,7063	1,8403
Коэффициент	b23	b24	b25	b26
Значение	0,00516	-0,0033	-0,0011	0,00109
Критерий	t23	t24	t25	t26
Значение	3,57235	2,2733	0,7578	0,75777
Коэффициент	b34	b35	b36	b45
Значение	-0,0148	0,00297	-0,0098	-0,0042
Критерий	t34	t35	t36	t45
Значение	10,284	2,05681	-6,82	-2,9228
Коэффициент	b46	b56	-	-
Значение	-0,0002	-0,0017	-	-
Критерий	t46	t56	-	-
Значение	0,1083	1,1908	-	-

После сравнения с табличным значением критерия исключаются незначимые коэффициенты, получаем уравнение регрессии – формулу 15. В декодированном виде формула приобретает вид формулы 16.

$$y = 0,093 - 0,012x_5 - 0,007x_6 - 0,015x_3x_4 \quad (15)$$

$$y = 0,093 - 0,012((S - 225)/175) - 0,007((I - 315)/215) - \quad (16)$$

$$0,015((\varphi - 70)/15)((H - 24,05)/23,95)$$

Осуществим расчёты в соответствии с планом эксперимента и полученным уравнением регрессии. Результаты расчётов для оксидов азота сведем в таблицу 12.

Таблица 12 – Полный факторный эксперимент и результаты расчетов для оксидов азота

x1	x2	x3	x4	x5	x6	У <sub>эсп</sub>	У <sub>расч</sub>	У <sub>эсп</sub> -У <sub>расч</sub> <sup>2</sup>
-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,07	0,097	0,000729
1	-1	-1	-1	-1	-1	0,11	0,097	0,000169
-1	1	-1	-1	-1	-1	0,07	0,097	0,000729
1	1	-1	-1	-1	-1	0,08	0,097	0,000289
-1	-1	1	-1	-1	-1	0,15	0,127	0,000529
1	-1	1	-1	-1	-1	0,17	0,127	0,001849
-1	1	1	-1	-1	-1	0,12	0,127	4,9E-05
1	1	1	-1	-1	-1	0,14	0,127	0,000169
-1	-1	-1	1	-1	-1	0,09	0,127	0,001369
1	-1	-1	1	-1	-1	0,07	0,127	0,003249
-1	1	-1	1	-1	-1	0,12	0,127	4,9E-05
1	1	-1	1	-1	-1	0,2	0,127	0,005329
-1	-1	1	1	-1	-1	0,14	0,097	0,001849
1	-1	1	1	-1	-1	0,08	0,097	0,000289
-1	1	1	1	-1	-1	0,15	0,097	0,002809
1	1	1	1	-1	-1	0,01	0,097	0,007569
-1	-1	-1	-1	1	-1	0,04	0,073	0,001089
1	-1	-1	-1	1	-1	0,07	0,073	9E-06
-1	1	-1	-1	1	-1	0,01	0,073	0,003969
1	1	-1	-1	1	-1	0,01	0,073	0,003969
-1	-1	1	-1	1	-1	0,13	0,103	0,000729
1	-1	1	-1	1	-1	0,09	0,103	0,000169
-1	1	1	-1	1	-1	0,2	0,103	0,009409
1	1	1	-1	1	-1	0,07	0,103	0,001089
-1	-1	-1	1	1	-1	0,12	0,103	0,000289
1	-1	-1	1	1	-1	0,21	0,103	0,011449
-1	1	-1	1	1	-1	0,06	0,103	0,001849
1	1	-1	1	1	-1	0,05	0,103	0,002809
-1	-1	1	1	1	-1	0,08	0,073	4,9E-05
1	-1	1	1	1	-1	0,06	0,073	0,000169
-1	1	1	1	1	-1	0,05	0,073	0,000529

Продолжение таблицы 12

x1	x2	x3	x4	x5	x6	Уэксп	Урасч	Уэксп-Урасч <sup>2</sup>
1	1	1	1	1	-1	0,19	0,073	0,013689
-1	-1	-1	-1	-1	1	0,09	0,083	4,9E-05
1	-1	-1	-1	-1	1	0,07	0,083	0,000169
-1	1	-1	-1	-1	1	0,11	0,083	0,000729
1	1	-1	-1	-1	1	0,07	0,083	0,000169
-1	-1	1	-1	-1	1	0,01	0,113	0,010609
1	-1	1	-1	-1	1	0,13	0,113	0,000289
-1	1	1	-1	-1	1	0,05	0,113	0,003969
1	1	1	-1	-1	1	0,1	0,113	0,000169
-1	-1	-1	1	-1	1	0,11	0,113	9E-06
1	-1	-1	1	-1	1	0,18	0,113	0,004489
-1	1	-1	1	-1	1	0,1	0,113	0,000169
1	1	-1	1	-1	1	0,12	0,113	4,9E-05
-1	-1	1	1	-1	1	0,11	0,083	0,000729
1	-1	1	1	-1	1	0,14	0,083	0,003249
-1	1	1	1	-1	1	0,08	0,083	9E-06
1	1	1	1	-1	1	0,12	0,083	0,001369
-1	-1	-1	-1	1	1	0,08	0,059	0,000441
1	-1	-1	-1	1	1	0,04	0,059	0,000361
-1	1	-1	-1	1	1	0,07	0,059	0,000121
1	1	-1	-1	1	1	0,12	0,059	0,003721
-1	-1	1	-1	1	1	0,12	0,089	0,000961
1	-1	1	-1	1	1	0,05	0,089	0,001521
-1	1	1	-1	1	1	0,08	0,089	8,1E-05
1	1	1	-1	1	1	0,11	0,089	0,000441
-1	-1	-1	1	1	1	0,09	0,089	0,000001
1	-1	-1	1	1	1	0,12	0,089	0,000961
-1	1	-1	1	1	1	0,08	0,089	8,1E-05
1	1	-1	1	1	1	0,01	0,089	0,006241
-1	-1	1	1	1	1	0,04	0,059	0,000361
1	-1	1	1	1	1	0,03	0,059	0,000841
-1	1	1	1	1	1	0,06	0,059	0,000001
1	1	1	1	1	1	0,05	0,059	8,1E-05

Результата расчёта дисперсии остатков, расчётный и табличный критерий Фишера приведём в таблице 13.



Таблица 13 – Расчёты для оценки адекватности модели

$S_{ост}$	F	$F_{табл}$
0,002046237	1,417674779	19,5

Вывод: модель адекватна.

### 3.2 Регрессионный анализ модели рассеивания диоксида серы в атмосферном воздухе

Для оценки дисперсии воспроизводимости произведена серия параллельных опытов. Результаты параллельных экспериментов для оценки воспроизводимости приведем в таблице 14. Результаты расчётов по формулам (9), (10), (12) приведем в таблице 15.

Таблица 14 – Результаты параллельных экспериментов для оценки воспроизводимости

x1	x2	x3	x4	x5	x6	y
0	0	0	0	0	0	0,041
0	0	0	0	0	0	0,044
0	0	0	0	0	0	0,035

Таблица 15 – Результаты оценки воспроизводимости

$U_{ср}$	$S_{воспр}$	$S_b$
0,04	0,000021	0,000572822

Произведём расчёт коэффициентов уравнения по формулам (6) – (8), определим расчётные значения критериев Стьюдента коэффициентов по формуле (11). Результаты приведём в таблице 16.

Таблица 16 – Значения коэффициентов и критериев Стьюдента

Коэффициент	b0	b1	b2	b3
Значение	0,02326	0,00066	0,001984375	-0,001465625
Критерий	t0	t1	t2	t3
Значение	40,6049	1,14564	3,464209007	2,558604763
Коэффициент	b4	b5	b6	b12
Значение	-0,002921875	-0,00150625	-0,0048375	-0,0024
Критерий	t4	t5	t6	t12
Значение	5,100843184	2,629525577	8,445032352	4,1898
Коэффициент	b13	b14	b15	b16
Значение	0,00098	-0,0009	-0,0014	-0,0012
Критерий	t13	t14	t15	t16
Значение	1,71301	1,6257	2,4277	2,0567
Коэффициент	b23	b24	b25	b26
Значение	0,00223	-0,0016	-0,0005	0,00029
Критерий	t23	t24	t25	t26
Значение	3,88973	2,8314	0,8947	0,51281
Коэффициент	b34	b35	b36	b45
Значение	-0,0029	-0,0002	0,00125	-0,002
Критерий	t34	t35	t36	t45
Значение	5,1445	0,3273	2,18218	3,5024
Коэффициент	b46	b56	-	-
Значение	0,00226	0,00028	-	-
Критерий	t46	t56	-	-
Значение	3,93883	0,48553	-	-

После сравнения с табличным значением критерия исключаются незначимые коэффициенты, получаем уравнение регрессии – формулу 17. В декодированном виде формула приобретает вид формулы 18

$$y = 0,0233 - 0,0029x_4 - 0,0048x_6 - 0,0029x_3x_4 \quad (17)$$

$$y = 0,0233 - 0,0029((S - 225)/175) - 0,0048((I - 315)/215) - 0,0029((\varphi - 70)/15)((H - 24,05)/23,95) \quad (18)$$

Осуществим расчёты в соответствии с планом эксперимента и полученным уравнением регрессии. Результаты расчётов для диоксида серы сведем в таблицу 17.

Таблица 17 – Полный факторный эксперимент и результаты расчетов для диоксида серы

x1	x2	x3	x4	x5	x6	У <sub>эсп</sub>	У <sub>расч</sub>	У <sub>эсп</sub> -У <sub>расч</sub> <sup>2</sup>
-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,0333	0,0281	0,00002704
1	-1	-1	-1	-1	-1	0,0395	0,0281	0,00012996
-1	1	-1	-1	-1	-1	0,0395	0,0281	0,00012996
1	1	-1	-1	-1	-1	0,0336	0,0281	0,00003025
-1	-1	1	-1	-1	-1	0,0136	0,0339	0,00041209
1	-1	1	-1	-1	-1	0,0448	0,0339	0,00011881
-1	1	1	-1	-1	-1	0,033	0,0339	8,1E-07
1	1	1	-1	-1	-1	0,043	0,0339	8,281E-05
-1	-1	-1	1	-1	-1	0,0132	0,0281	0,00022201
1	-1	-1	1	-1	-1	0,031	0,0281	0,00000841
-1	1	-1	1	-1	-1	0,0132	0,0281	0,00022201
1	1	-1	1	-1	-1	0,0252	0,0281	0,00000841
-1	-1	1	1	-1	-1	0,011	0,0223	0,00012769
1	-1	1	1	-1	-1	0,0219	0,0223	1,6E-07
-1	1	1	1	-1	-1	0,0481	0,0223	0,00066564
1	1	1	1	-1	-1	0,0342	0,0223	0,00014161
-1	-1	-1	-1	1	-1	0,0412	0,0281	0,00017161
1	-1	-1	-1	1	-1	0,0234	0,0281	0,00002209
-1	1	-1	-1	1	-1	0,0314	0,0281	0,00001089
1	1	-1	-1	1	-1	0,0337	0,0281	0,00003136
-1	-1	1	-1	1	-1	0,0207	0,0339	0,00017424
1	-1	1	-1	1	-1	0,0388	0,0339	0,00002401
-1	1	1	-1	1	-1	0,0267	0,0339	0,00005184
1	1	1	-1	1	-1	0,0362	0,0339	5,29E-06
-1	-1	-1	1	1	-1	0,0352	0,0281	0,00005041
1	-1	-1	1	1	-1	0,033	0,0281	0,00002401
-1	1	-1	1	1	-1	0,0372	0,0281	8,281E-05
1	1	-1	1	1	-1	0,0294	0,0281	0,00000169
-1	-1	1	1	1	-1	0,0139	0,0223	0,00007056
1	-1	1	1	1	-1	0,008	0,0223	0,00020449
-1	1	1	1	1	-1	0,009	0,0223	0,00017689
1	1	1	1	1	-1	0,0032	0,0223	0,00036481
-1	-1	-1	-1	-1	1	0,0064	0,0185	0,00014641
1	-1	-1	-1	-1	1	0,0149	0,0185	0,00001296
-1	1	-1	-1	-1	1	0,0197	0,0185	1,44E-06
1	1	-1	-1	-1	1	0,0128	0,0185	0,00003249
-1	-1	1	-1	-1	1	0,0095	0,0243	0,00021904
1	-1	1	-1	-1	1	0,021	0,0243	0,00001089
-1	1	1	-1	-1	1	0,0188	0,0243	0,00003025
1	1	1	-1	-1	1	0,0275	0,0243	0,00001024
-1	-1	-1	1	-1	1	0,039	0,0185	0,00042025

Продолжение таблицы 17

x1	x2	x3	x4	x5	x6	Уэксп	Урасч	Уэксп-Урасч <sup>2</sup>
1	-1	-1	1	-1	1	0,0385	0,0185	0,0004
-1	1	-1	1	-1	1	0,0471	0,0185	0,00081796
1	1	-1	1	-1	1	0,0098	0,0185	7,569E-05
-1	-1	1	1	-1	1	0,0097	0,0127	9E-06
1	-1	1	1	-1	1	0,009	0,0127	0,00001369
-1	1	1	1	-1	1	0,0084	0,0127	0,00001849
1	1	1	1	-1	1	0,0223	0,0127	9,216E-05
-1	-1	-1	-1	1	1	0,011	0,0185	0,00005625
1	-1	-1	-1	1	1	0,0144	0,0185	0,00001681
-1	1	-1	-1	1	1	0,008	0,0185	0,00011025
1	1	-1	-1	1	1	0,0324	0,0185	0,00019321
-1	-1	1	-1	1	1	0,0097	0,0243	0,00021316
1	-1	1	-1	1	1	0,019	0,0243	0,00002809
-1	1	1	-1	1	1	0,071	0,0243	0,00218089
1	1	1	-1	1	1	0,0093	0,0243	0,000225
-1	-1	-1	1	1	1	0,0157	0,0185	7,84E-06
1	-1	-1	1	1	1	0,0098	0,0185	7,569E-05
-1	1	-1	1	1	1	0,0097	0,0185	0,00007744
1	1	-1	1	1	1	0,009	0,0185	9,025E-05
-1	-1	1	1	1	1	0,0084	0,0127	0,00001849
1	-1	1	1	1	1	0,0223	0,0127	9,216E-05
-1	1	1	1	1	1	0,011	0,0127	2,89E-06
1	1	1	1	1	1	0,0144	0,0127	2,89E-06

Результата расчёта дисперсии остатков, расчётный и табличный критерий Фишера приведём в таблице 18.

Таблица 18 – Расчёты для оценки адекватности модели

S <sub>ост</sub>	F	F <sub>табл</sub>
0,000160965	0,28100369	19,5

Вывод: модель адекватна.

### 3.3 Регрессионный анализ модели рассеивания оксида углерода в атмосферном воздухе

Для оценки дисперсии воспроизводимости произведена серия параллельных опытов. Результаты параллельных экспериментов для оценки воспроизводимости приведем в таблице 19. Результаты расчётов по формулам (9), (10), (12) приведем в таблице 20.

Таблица 19 – Результаты параллельных экспериментов для оценки воспроизводимости

x1	x2	x3	x4	x5	x6	y
0	0	0	0	0	0	1,7
0	0	0	0	0	0	0,3
0	0	0	0	0	0	2

Таблица 20 – Результаты оценки воспроизводимости

Уср	S <sub>воспр</sub>	S <sub>b</sub>
1,333333	0,823333	0,113422147

Произведём расчёт коэффициентов уравнения по формулам (6) – (8), определим расчётные значения критериев Стьюдента коэффициентов по формуле (11). Результаты приведём в таблице 21.

Таблица 21 – Значения коэффициентов и критериев Стьюдента

Коэффициент	b0	b1	b2	b3
Значение	1,02031	0,13594	-0,0390625	-0,1484375
Критерий	t0	t1	t2	t3
Значение	8,99571	1,19851	0,34439923	1,308717076
Коэффициент	b4	b5	b6	b12
Значение	-0,1296875	-0,2109375	-0,1078125	0,10781
Критерий	t4	t5	t6	t12
Значение	1,143405445	1,859755845	0,950541876	0,95054
Коэффициент	b13	b14	b15	b16
Значение	-0,2891	-0,1766	0,10469	-0,0984
Критерий	t13	t14	t15	t16
Значение	2,5486	1,5567	0,92299	0,8679

Продолжение таблицы 21

Коэффициент	b23	b24	b25	b26
Значение	-0,0891	-0,0953	-0,2203	-0,0109
Критерий	t23	t24	t25	t26
Значение	0,7852	0,8403	1,9424	0,0964
Коэффициент	b34	b35	b36	b45
Значение	0,17656	0,15156	0,08594	0,15156
Критерий	t34	t35	t36	t45
Значение	1,55668	1,33627	0,75768	1,33627
Коэффициент	b46	b56	-	-
Значение	0,10469	0,21719	-	-
Критерий	t46	t56	-	-
Значение	0,92299	1,91486	-	-

После сравнения с табличным значением критерия исключаются незначимые коэффициенты, получаем уравнение регрессии – формулу 19. В декодированном виде формула приобретает вид формулы 20.

$$y = 1,02031 - 0,211x_5 - 0,289x_1x_3 - 0,220x_2x_5 + 0,217x_5x_6 \quad (19)$$

$$y = 1,02031 - 0,211((S - 225)/175) - 0,289((T - 4,5)/30,5)((\varphi - 70)/15) - 0,220((V - 3,9)/0,7)((S - 225)/175) + 0,217((S - 225)/175)((I - 315)/215) \quad (20)$$

Осуществим расчёты в соответствии с планом эксперимента и полученным уравнением регрессии. Результаты расчётов для оксида углерода сведём в таблицу 22.

Таблица 22 - Полный факторный эксперимент и результаты расчетов для оксида углерода

x1	x2	x3	x4	x5	x6	У <sub>эксп</sub>	У <sub>расч</sub>	У <sub>эксп</sub> -У <sub>расч</sub> <sup>2</sup>
-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,8	0,93931	0,019407276
1	-1	-1	-1	-1	-1	2,2	1,51731	0,466065636
-1	1	-1	-1	-1	-1	0,7	1,37931	0,461462076
1	1	-1	-1	-1	-1	6,7	1,95731	22,49310844
-1	-1	1	-1	-1	-1	2,5	1,51731	0,965679636
1	-1	1	-1	-1	-1	0,3	0,93931	0,408717276
-1	1	1	-1	-1	-1	1,1	1,95731	0,734980436

Продолжение таблицы 22

x1	x2	x3	x4	x5	x6	Уэксп	Урасч	Уэксп-Урасч <sup>2</sup>
1	1	1	-1	-1	-1	0,5	1,37931	0,773186076
-1	-1	-1	1	-1	-1	2	0,93931	1,125063276
1	-1	-1	1	-1	-1	0,3	1,51731	1,481843636
-1	1	-1	1	-1	-1	0,3	1,37931	1,164910076
1	1	-1	1	-1	-1	2,1	1,95731	0,020360436
-1	-1	1	1	-1	-1	1,3	1,51731	0,047223636
1	-1	1	1	-1	-1	1,9	0,93931	0,922925276
-1	1	1	1	-1	-1	1,7	1,95731	0,066208436
1	1	1	1	-1	-1	0,5	1,37931	0,773186076
-1	-1	-1	-1	1	-1	0,2	0,52331	0,104529356
1	-1	-1	-1	1	-1	3,2	1,10131	4,404499716
-1	1	-1	-1	1	-1	0,2	0,08331	0,013616556
1	1	-1	-1	1	-1	1,4	0,66131	0,545662916
-1	-1	1	-1	1	-1	0,6	1,10131	0,251311716
1	-1	1	-1	1	-1	0,5	0,52331	0,000543356
-1	1	1	-1	1	-1	0,3	0,66131	0,130544916
1	1	1	-1	1	-1	0,6	0,08331	0,266968556
-1	-1	-1	1	1	-1	0,9	0,52331	0,141895356
1	-1	-1	1	1	-1	0,2	1,10131	0,812359716
-1	1	-1	1	1	-1	0,5	0,08331	0,173630556
1	1	-1	1	1	-1	0,1	0,66131	0,315068916
-1	-1	1	1	1	-1	0,7	1,10131	0,161049716
1	-1	1	1	1	-1	0,9	0,52331	0,141895356
-1	1	1	1	1	-1	0,5	0,66131	0,026020916
1	1	1	1	1	-1	0,4	0,08331	0,100292556
-1	-1	-1	-1	-1	1	0,8	0,50531	0,086842196
1	-1	-1	-1	-1	1	1,8	1,08331	0,513644556
-1	1	-1	-1	-1	1	0,8	0,94531	0,021114996
1	1	-1	-1	-1	1	2,1	1,52331	0,332571356
-1	-1	1	-1	-1	1	0,7	1,08331	0,146926556
1	-1	1	-1	-1	1	0,5	0,50531	2,81961E-05
-1	1	1	-1	-1	1	2,5	1,52331	0,953923356
1	1	1	-1	-1	1	0,2	0,94531	0,555486996
-1	-1	-1	1	-1	1	1,2	0,50531	0,482594196
1	-1	-1	1	-1	1	0,1	1,08331	0,966898556
-1	1	-1	1	-1	1	2,3	0,94531	1,835184996
1	1	-1	1	-1	1	0,3	1,52331	1,496487356
-1	-1	1	1	-1	1	0,3	1,08331	0,613574556
1	-1	1	1	-1	1	0,1	0,50531	0,164276196
-1	1	1	1	-1	1	0,2	1,52331	1,751149356
1	1	1	1	-1	1	0,6	0,94531	0,119238996
-1	-1	-1	-1	1	1	0,2	0,95731	0,573518436

Продолжение таблицы 22

x1	x2	x3	x4	x5	x6	У <sub>эсп</sub>	У <sub>расч</sub>	У <sub>эсп</sub> -У <sub>расч</sub> <sup>2</sup>
-1	1	-1	-1	1	1	0,1	0,51731	0,174147636
1	1	-1	-1	1	1	1	1,09531	0,009083996
-1	-1	1	-1	1	1	1,7	1,53531	0,027122796
1	-1	1	-1	1	1	0,1	0,95731	0,734980436
-1	1	1	-1	1	1	0,2	1,09531	0,801579996
1	1	1	-1	1	1	0,9	0,51731	0,146451636
-1	-1	-1	1	1	1	0,6	0,95731	0,127670436
1	-1	-1	1	1	1	2	1,53531	0,215936796
-1	1	-1	1	1	1	0,3	0,51731	0,047223636
1	1	-1	1	1	1	0,6	1,09531	0,245331996
-1	-1	1	1	1	1	2	1,53531	0,215936796
1	-1	1	1	1	1	1,9	0,95731	0,888664436
-1	1	1	1	1	1	0,1	1,09531	0,990641996
1	1	1	1	1	1	1,6	0,51731	1,172217636

Результата расчёта дисперсии остатков, расчётный и табличный критерий Фишера приведём в таблице 23.

Таблица 23 – Расчёты для оценки адекватности модели

S <sub>ост</sub>	F	F <sub>табл</sub>
0,948186064	8,359796497	19,5

Вывод: модель адекватна.

### 3.4 Регрессионный анализ модели рассеивания взвешенных веществ в атмосферном воздухе

Для оценки дисперсии воспроизводимости произведена серия параллельных опытов. Результаты параллельных экспериментов для оценки воспроизводимости приведем в таблице 24. Результаты расчётов по формулам (9), (10), (12) приведем в таблице 25.



Таблица 24 – Результаты параллельных экспериментов для оценки воспроизводимости

x1	x2	x3	x4	x5	x6	y
0	0	0	0	0	0	0,17
0	0	0	0	0	0	0,12
0	0	0	0	0	0	0,14

Таблица 25 – Результаты оценки воспроизводимости

У <sub>ср</sub>	S <sub>воспр</sub>	S <sub>b</sub>
0,143333	0,000633	0,003145764

Произведём расчёт коэффициентов уравнения по формулам (6) – (8), определим расчётные значения критериев Стьюдента коэффициентов по формуле (11). Результаты приведём в таблице 26.

Таблица 26 – Значения коэффициентов и критериев Стьюдента

Коэффициент	b0	b1	b2	b3
Значение	0,06559	0,00125	-0,002125	0,00775
Критерий	t0	t1	t2	t3
Значение	20,8515	0,39736	0,6755115	2,463630184
Коэффициент	b4	b5	b6	b12
Значение	-0,03134375	-0,01878125	0,010875	-0,0047
Критерий	t4	t5	t6	t12
Значение	9,963794656	5,970329599	3,457029452	1,4802
Коэффициент	b13	b14	b15	b16
Значение	-0,0062	-0,0056	-0,0004	-0,0013
Критерий	t13	t14	t15	t16
Значение	1,957	1,7881	0,1192	0,4272
Коэффициент	b23	b24	b25	b26
Значение	-0,0113	0,01525	0,0045	0,00053
Критерий	t23	t24	t25	t26
Значение	3,5862	4,84779	1,43049	0,16888
Коэффициент	b34	b35	b36	b45
Значение	0,00375	0,00619	0,00441	0,02609
Критерий	t34	t35	t36	t45
Значение	1,19208	1,96693	1,40069	8,29488
Коэффициент	b46	b56	-	-
Значение	-0,0013	0,00925	-	-
Критерий	t46	t56	-	-
Значение	-0,3974	2,94046	-	-

После сравнения с табличным значением критерия исключаются незначимые коэффициенты, получаем уравнение регрессии – формулу 21. В декодированном виде формула приобретает вид формулы 22.

$$y = 0,066 - 0,031x_4 - 0,019x_5 + 0,015x_2x_4 + 0,026x_4x_5 \quad (21)$$

$$y = 0,066 - 0,031((H - 24,05)/23,95) - 0,019((S - 225)/175) - +0,015((V - 3,9)/0,7) ((H - 24,05)/23,95) + 0,026((H - 24,05)/23,95) ((S - 225)/175) \quad (22)$$

Осуществим расчёты в соответствии с планом эксперимента и полученным уравнением регрессии. Результаты расчётов для взвешенных веществ сведем в таблицу 27.

Таблица 27 - Полный факторный эксперимент и результаты расчетов для взвешенных веществ

x1	x2	x3	x4	x5	x6	У <sub>эксп</sub>	У <sub>расч</sub>	У <sub>эксп</sub> -У <sub>расч</sub> <sup>2</sup>
-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,008	0,157	0,022201
1	-1	-1	-1	-1	-1	0,144	0,157	0,000169
-1	1	-1	-1	-1	-1	0,131	0,127	0,000016
1	1	-1	-1	-1	-1	0,187	0,127	0,0036
-1	-1	1	-1	-1	-1	0,187	0,157	0,0009
1	-1	1	-1	-1	-1	0,23	0,157	0,005329
-1	1	1	-1	-1	-1	0,212	0,127	0,007225
1	1	1	-1	-1	-1	0,016	0,127	0,012321
-1	-1	-1	1	-1	-1	0,047	0,013	0,001156
1	-1	-1	1	-1	-1	0,019	0,013	3,6E-05
-1	1	-1	1	-1	-1	0,028	0,043	0,000225
1	1	-1	1	-1	-1	0,026	0,043	0,000289
-1	-1	1	1	-1	-1	0,013	0,013	7,52316E-35
1	-1	1	1	-1	-1	0,015	0,013	4E-06
-1	1	1	1	-1	-1	0,014	0,043	0,000841
1	1	1	1	-1	-1	0,047	0,043	1,6E-05
-1	-1	-1	-1	1	-1	0,06	0,067	4,9E-05
1	-1	-1	-1	1	-1	0,04	0,067	0,000729
-1	1	-1	-1	1	-1	0,014	0,037	0,000529
1	1	-1	-1	1	-1	0,028	0,037	8,1E-05
-1	-1	1	-1	1	-1	0,017	0,067	0,0025

Продолжение таблицы 27

x1	x2	x3	x4	x5	x6	Уэксп	Урасч	Уэксп-Урасч <sup>2</sup>
1	-1	1	-1	1	-1	0,054	0,067	0,000169
-1	1	1	-1	1	-1	0,017	0,037	0,0004
1	1	1	-1	1	-1	0,012	0,037	0,000625
-1	-1	-1	1	1	-1	0,01	0,027	0,000289
1	-1	-1	1	1	-1	0,036	0,027	8,1E-05
-1	1	-1	1	1	-1	0,024	0,057	0,001089
1	1	-1	1	1	-1	0,02	0,057	0,001369
-1	-1	1	1	1	-1	0,014	0,027	0,000169
1	-1	1	1	1	-1	0,024	0,027	9E-06
-1	1	1	1	1	-1	0,038	0,057	0,000361
1	1	1	1	1	-1	0,019	0,057	0,001444
-1	-1	-1	-1	-1	1	0,144	0,157	0,000169
1	-1	-1	-1	-1	1	0,131	0,157	0,000676
-1	1	-1	-1	-1	1	0,187	0,127	0,0036
1	1	-1	-1	-1	1	0,187	0,127	0,0036
-1	-1	1	-1	-1	1	0,23	0,157	0,005329
1	-1	1	-1	-1	1	0,212	0,157	0,003025
-1	1	1	-1	-1	1	0,016	0,127	0,012321
1	1	1	-1	-1	1	0,047	0,127	0,0064
-1	-1	-1	1	-1	1	0,019	0,013	3,6E-05
1	-1	-1	1	-1	1	0,028	0,013	0,000225
-1	1	-1	1	-1	1	0,026	0,043	0,000289
1	1	-1	1	-1	1	0,013	0,043	0,0009
-1	-1	1	1	-1	1	0,015	0,013	4E-06
1	-1	1	1	-1	1	0,014	0,013	1E-06
-1	1	1	1	-1	1	0,047	0,043	1,6E-05
1	1	1	1	-1	1	0,06	0,043	0,000289
-1	-1	-1	-1	1	1	0,04	0,067	0,000729
1	-1	-1	-1	1	1	0,014	0,067	0,002809
-1	1	-1	-1	1	1	0,028	0,037	8,1E-05
1	1	-1	-1	1	1	0,144	0,037	0,011449
-1	-1	1	-1	1	1	0,131	0,067	0,004096
1	-1	1	-1	1	1	0,187	0,067	0,0144
-1	1	1	-1	1	1	0,019	0,037	0,000324
1	1	1	-1	1	1	0,028	0,037	8,1E-05
-1	-1	-1	1	1	1	0,026	0,027	1E-06
1	-1	-1	1	1	1	0,013	0,027	0,000196
-1	1	-1	1	1	1	0,015	0,057	0,001764
1	1	-1	1	1	1	0,014	0,057	0,001849
-1	-1	1	1	1	1	0,028	0,027	1E-06
1	-1	1	1	1	1	0,017	0,027	0,0001

Продолжение таблицы 27

x1	x2	x3	x4	x5	x6	У <sub>эсп</sub>	У <sub>расч</sub>	У <sub>эсп</sub> -У <sub>расч</sub> <sup>2</sup>
-1	1	1	1	1	1	0,254	0,057	0,038809
1	1	1	1	1	1	0,113	0,057	0,003136

Результата расчёта дисперсии остатков, расчётный и табличный критерий Фишера приведём в таблице 28.

Таблица 28 – Расчёты для оценки адекватности модели

S <sub>ост</sub>	F	F <sub>табл</sub>
0,003066542	0,974816303	19,5

Вывод: модель адекватна.

### 3.5 Анализ расчетных данных

В результате была получена система уравнений (14), (16), (18), (20):

$$C_{CO} = 1,0203 - 0,211x_5 - 0,289x_1x_3 - 0,220x_2x_5 + 0,217x_5x_6 \quad (14)$$

$$C_{NOx} = 0,093 - 0,012x_5 - 0,007x_6 - 0,015x_3x_4 \quad (16)$$

$$C_{SO_2} = 0,0233 - 0,0029x_4 - 0,0048x_6 - 0,0029x_3x_4 \quad (18)$$

$$C_{BB} = 0,066 - 0,031x_4 - 0,019x_5 + 0,015x_2x_4 + 0,026x_4x_5 \quad (20)$$

Проанализируем полученные уравнения, для чего построим ряд зависимостей. На рисунках 11 – 14 – зависимости для оксида углерода.

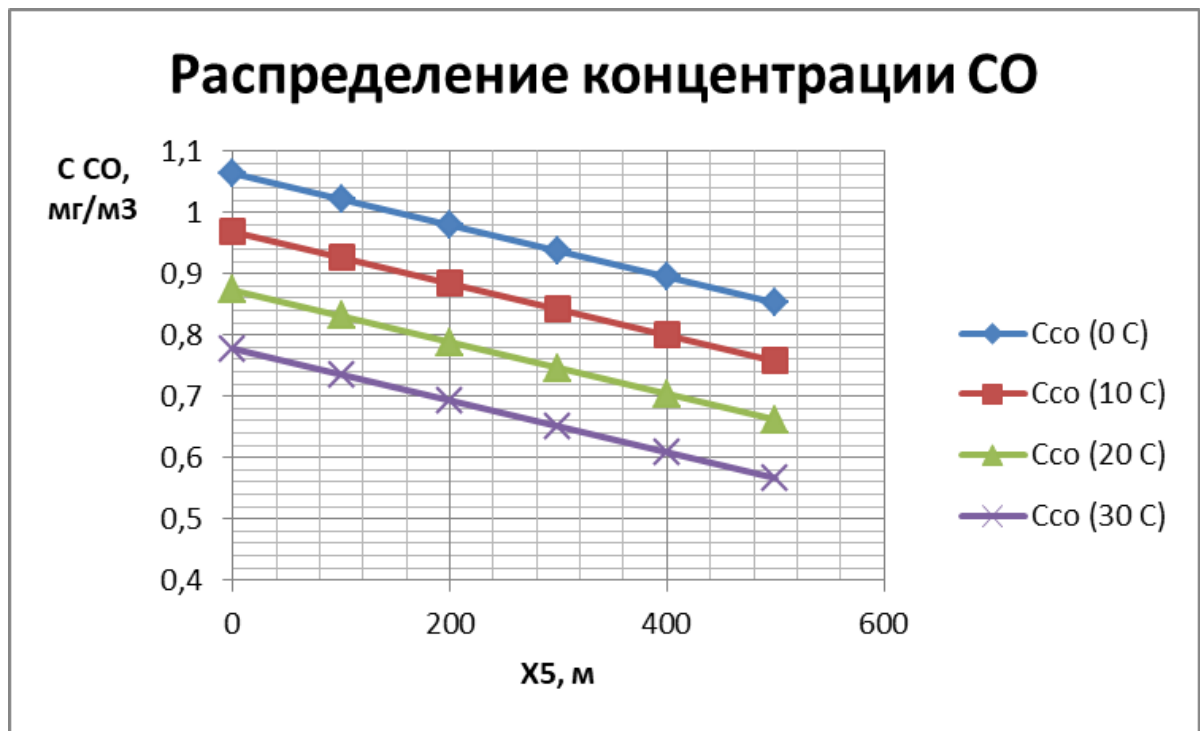


Рисунок 11 – Распределение концентрации угарного газа на разном удалении от трассы при относительной влажности 85%, интенсивности движения 315 автомобилей, температурах 0,10,20 и 30<sup>0</sup>С, скорости ветра 3,9 м/с

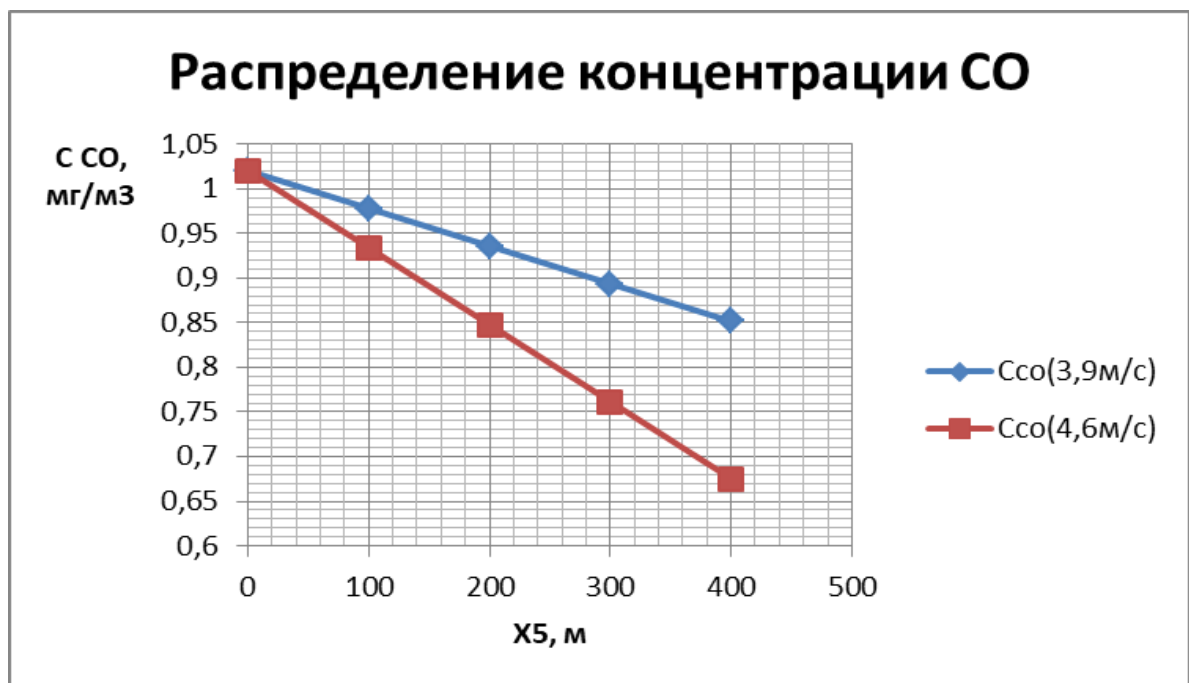


Рисунок 12 – Распределение концентрации угарного газа на разном удалении от трассы при относительной влажности 70%, интенсивности движения 315 автомобилей, температуре 4,5<sup>0</sup>С, скорости ветра 3,9 и 4,6 м/с

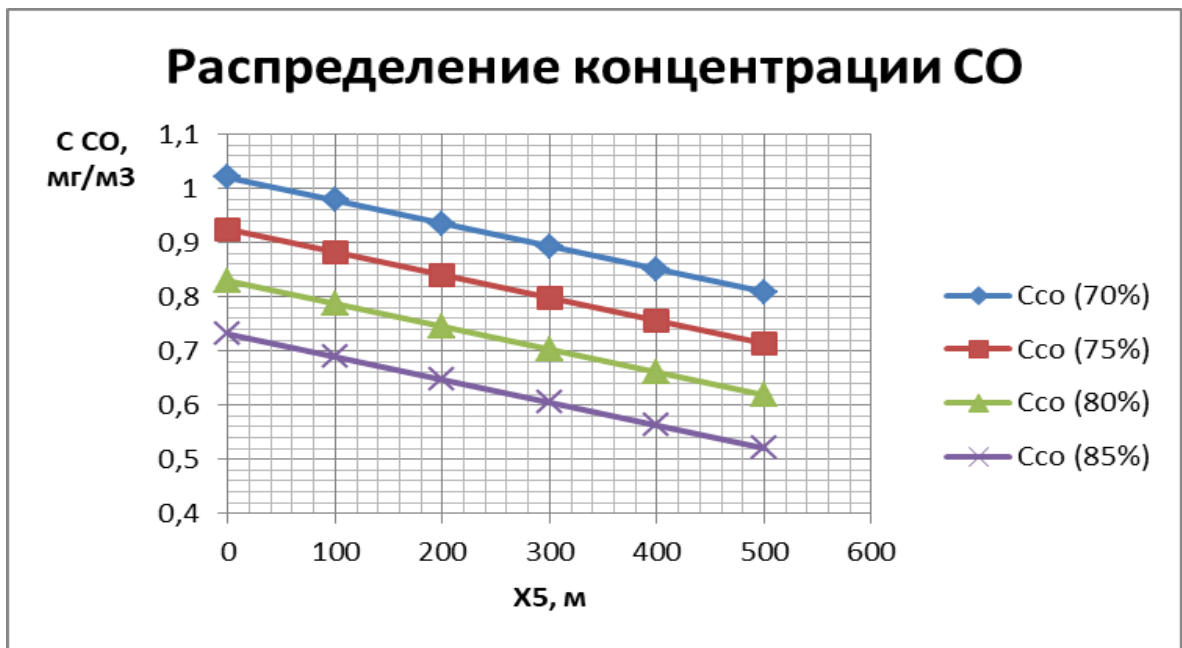


Рисунок 13 – Распределение концентрации угарного газа на разном удалении от трассы при интенсивности движения 315 автомобилей, температуре 35<sup>0</sup>С, скорости ветра 3,9 м/с, относительной влажности 70, 75, 80, 85 процентов

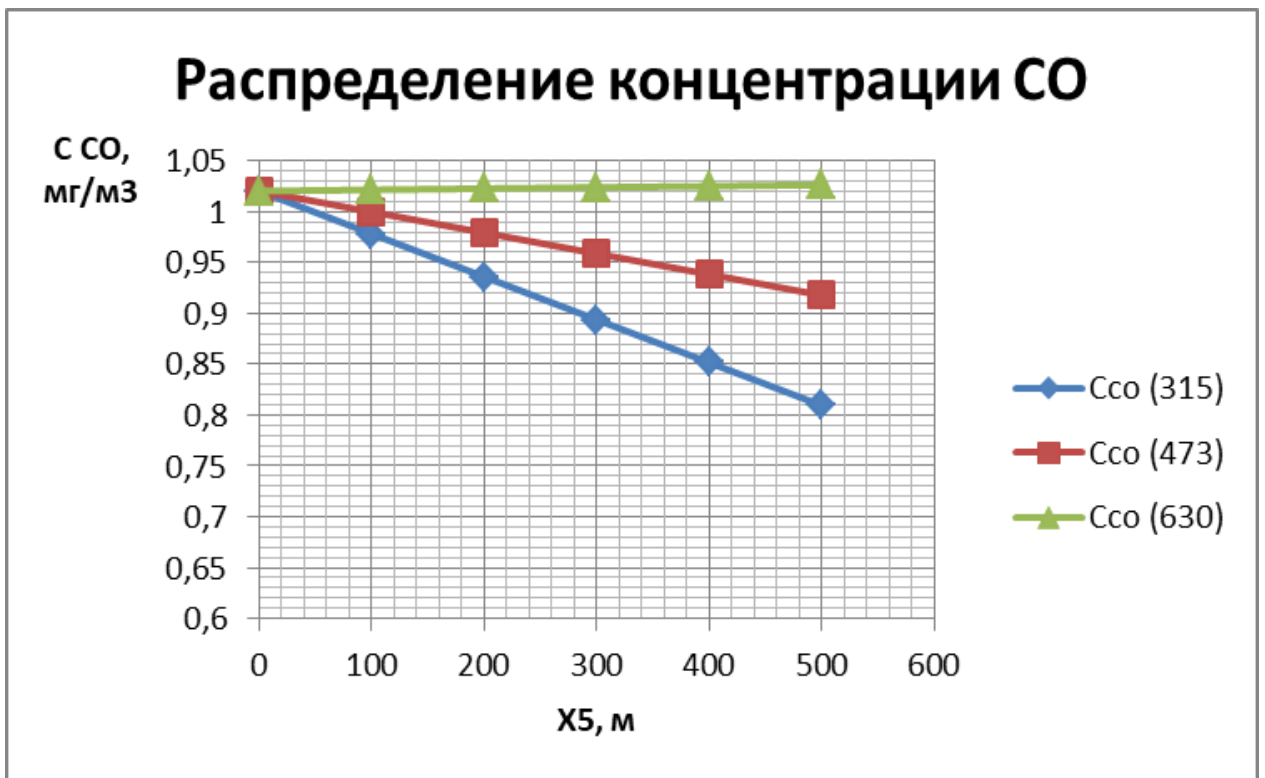


Рисунок 14 – Распределение концентрации угарного газа на разном удалении от трассы при интенсивности движения 315 автомобилей, температуре 35<sup>0</sup>С, скорости ветра 3,9 м/с, относительной влажности 70, 75, 80, 85 процентов

Проанализируем полученные зависимости:

– при удалении от трассы концентрация оксида углерода в подавляющем большинстве случаев снижается ввиду особенностей процесса диффузии;

– чем выше температура атмосферного воздуха при прочих равных условиях, тем меньшая концентрация оксида углерода устанавливается на местности, что может быть объяснено интенсификацией процесса теплопереноса при увеличении температуры;

– увеличение скорости ветра также способствует увеличению скорости конвективного переноса тепла и массы, что отражается в относительном снижении концентрации оксида углерода. также этому способствует увеличение относительной влажности воздуха, а соответственно и его плотности;

– увеличение интенсивности движения ожидаемо вызывает относительное увеличение концентрации оксида углерода за счёт увеличения суммарного выброса.

Приступим к построению зависимостей для оксидов азота, приведём их на рисунках 15 – 17.

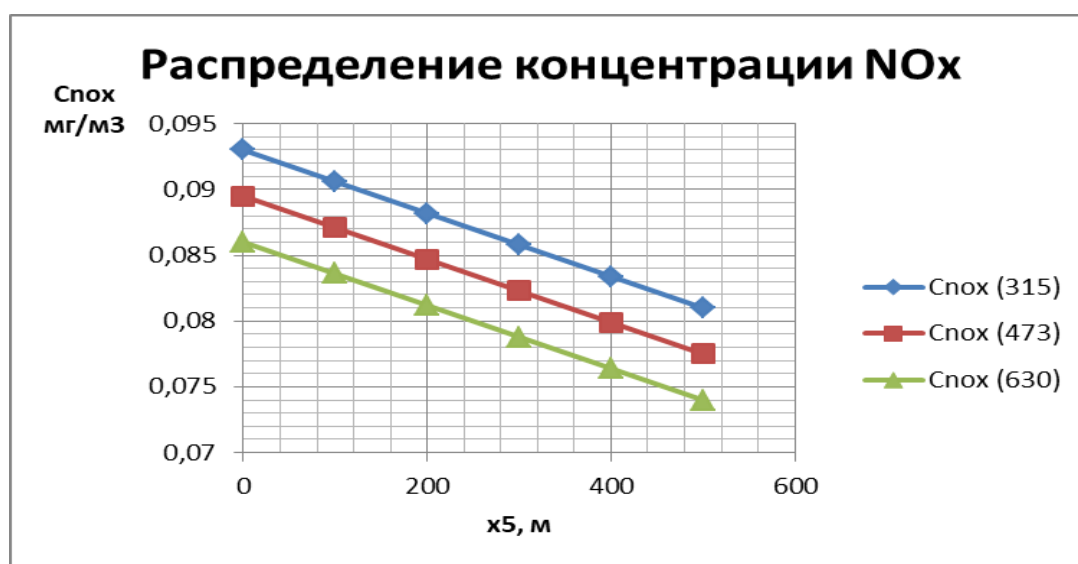


Рисунок 15 – Распределение концентрации оксидов азота на разном удалении от трассы при интенсивности движения 315,473,630 автомобилей, относительной влажности 70 процентов, высоте заграждений 24,05 м

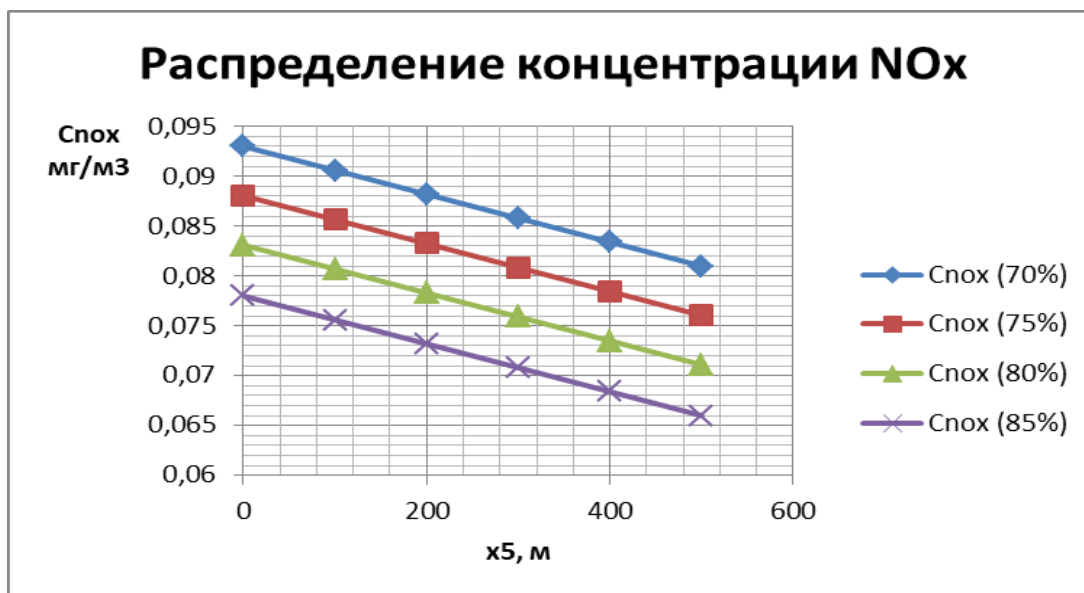


Рисунок 16 – Распределение концентрации оксидов азота на разном удалении от трассы при интенсивности движения 315 автомобилей, относительной влажности 70,75,80,85 процентов, высоте заграждений 48 м

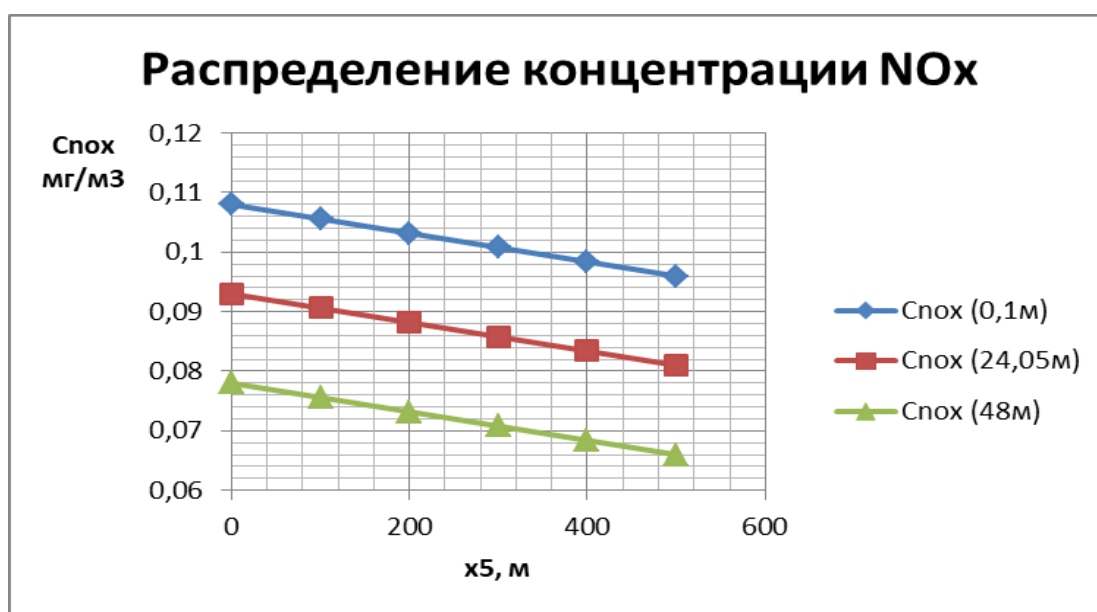


Рисунок 17 – Распределение концентрации оксидов азота на разном удалении от трассы при интенсивности движения 315 автомобилей, относительной влажности 85 процентов, высоте заграждений 0,1, 24,05 и 48 м

Отметим, что концентрация оксидов азота, по аналогии с концентрацией оксида углерода, уменьшается при увеличении дальности от дороги. Изменение интенсивности и относительной влажности воздуха влияет на распределение концентрации незначительно, в то время как увеличение



высоты ограждений ведет к снижению концентрации ввиду воздействия препятствий на процесс турбулентной диффузии.

Приступим к построению зависимостей для диоксида серы, приведём их на рисунках 18 – 20.

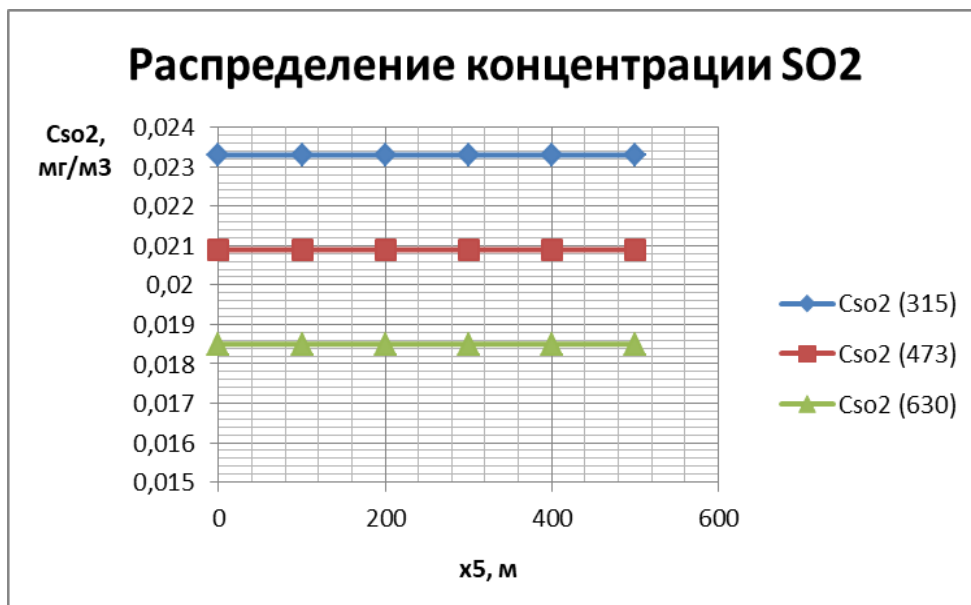


Рисунок 18 – Распределение концентрации диоксида серы на разном удалении от трассы при интенсивности движения 315,473,630 автомобилей, относительной влажности 70 процентов, высоте заграждений 24,05 м

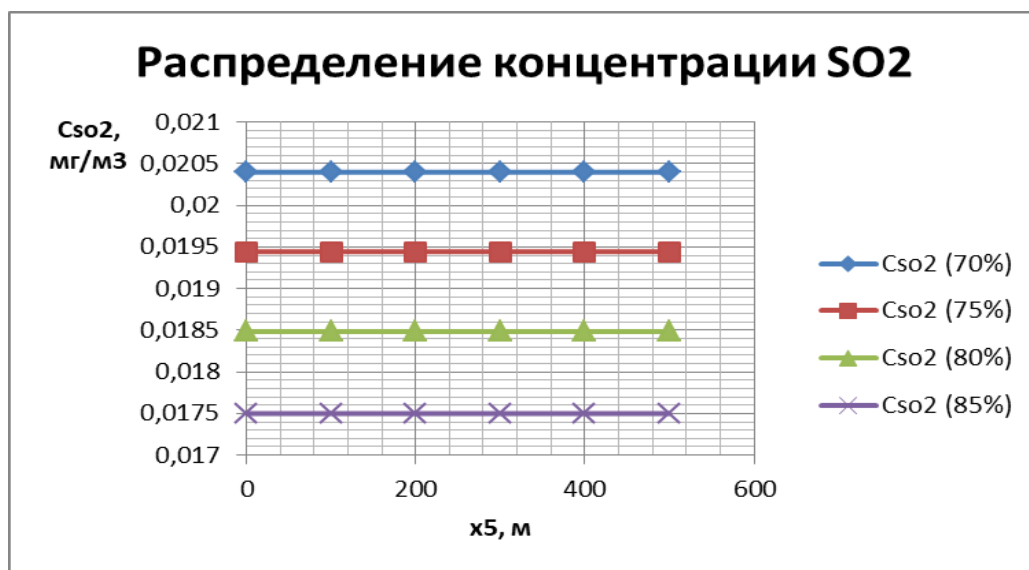


Рисунок 19 – Распределение концентрации диоксида серы на разном удалении от трассы при интенсивности движения 315 автомобилей, относительной влажности 70,75,80,85 процентов, высоте заграждений 48 м

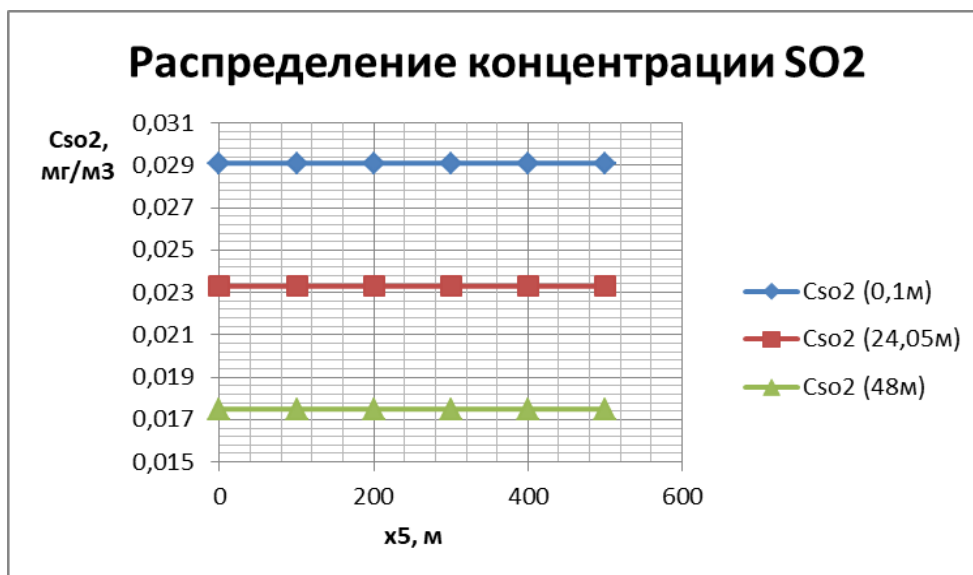


Рисунок 20 – Распределение концентрации диоксида серы на разном удалении от трассы при интенсивности движения 315 автомобилей, относительной влажности 85 процентов, высоте заграждений 0,1, 24,05, 48 м

Отметим, что концентрация диоксида серы, по аналогии с концентрацией оксидов азота, уменьшается при увеличении высоты ограждения, изменение интенсивности и относительной влажности воздуха влияет на распределение концентрации незначительно. В то же время стоит отметить отсутствие влияния удаления от дороги в заданном интервале дальностей.

Приступим к построению зависимостей для взвешенных веществ, приведём их на рисунках 21 – 22.

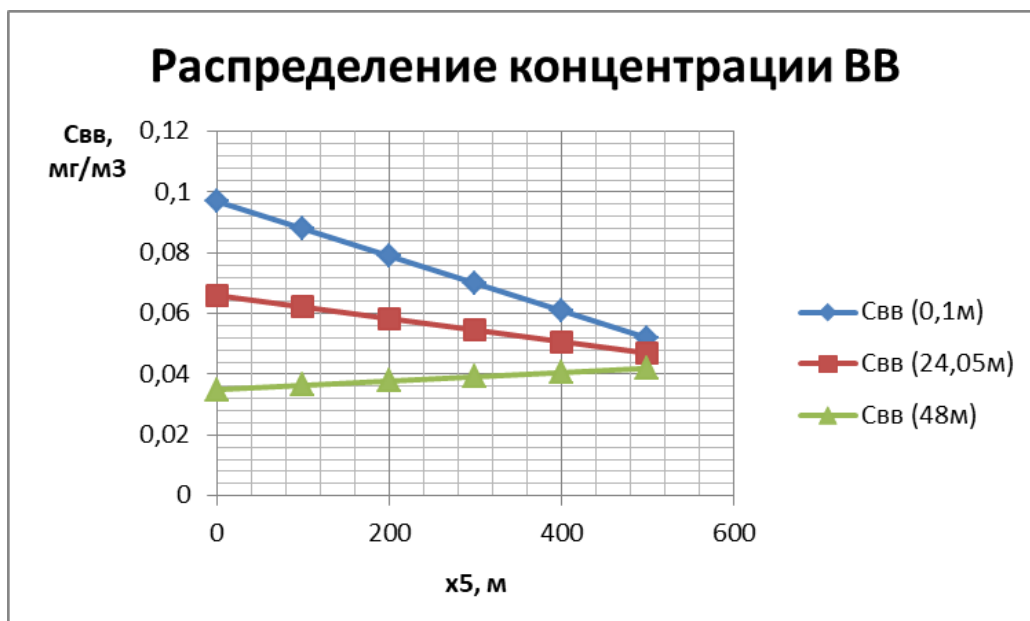


Рисунок 21 – Распределение концентрации взвешенных веществ на разном удалении от трассы при скорости ветра 3,9 м/с, высоте заграждений 0,1, 24,05, 48 м

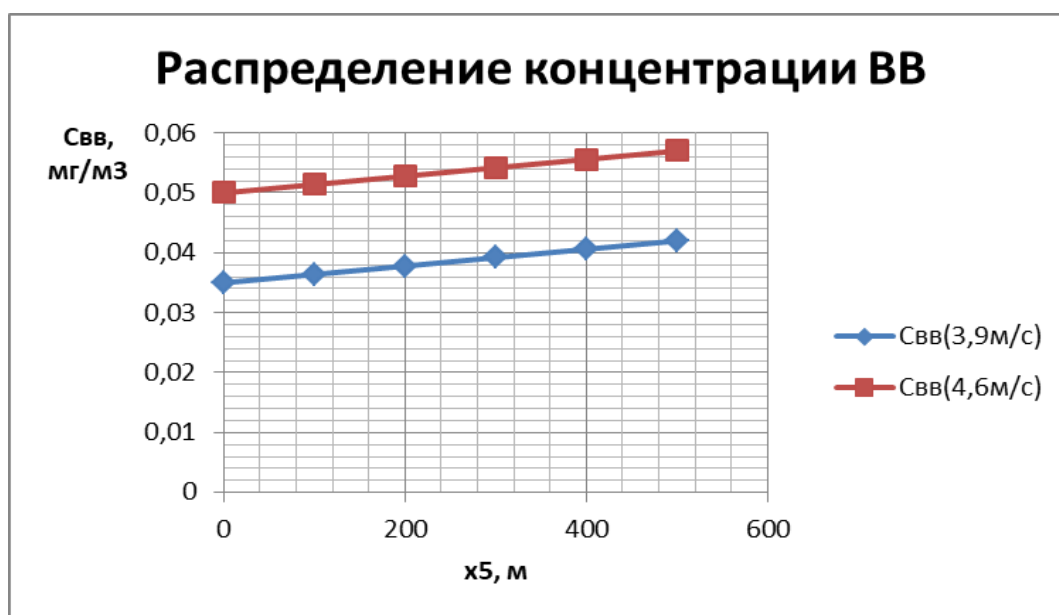


Рисунок 22 – Распределение концентрации взвешенных веществ на разном удалении от трассы при скорости ветра 3,9 и 4,8м/с, высоте заграждений 48 м

Стоит отметить, что увеличение высоты преград уменьшает концентрацию взвешенных веществ, в то время как увеличение скорости ветра, по всей видимости способствует поступлению взвешенных веществ в указанный интервал дальностей.

Также на основании полученной модели были построены зависимости распределения загрязняющих веществ от передвижных источников автотранспорта до селитебной территории (рисунки 23-26).

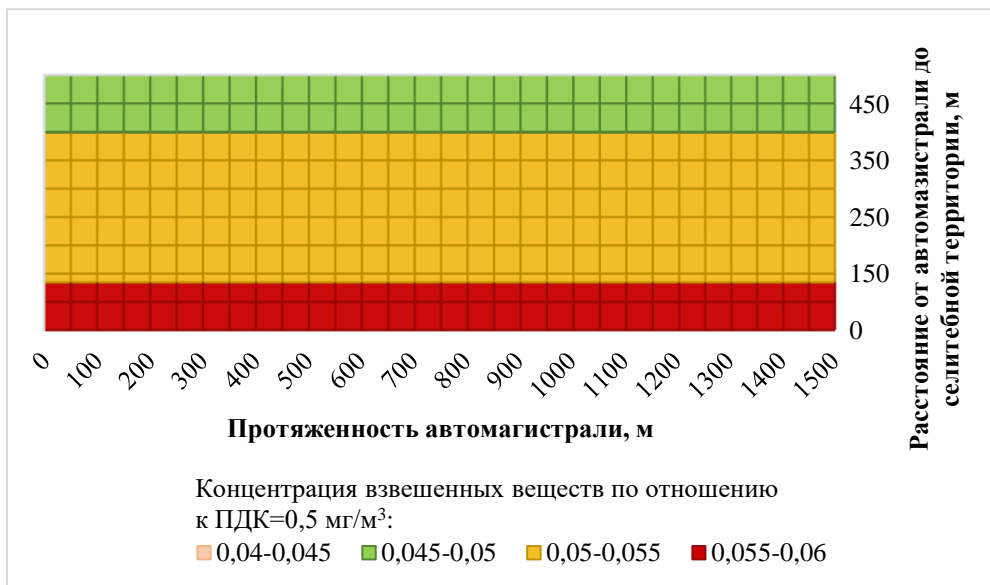


Рисунок 23 – Степень рассеивания взвешенных веществ от передвижного источника до ближайшей жилой застройки



Рисунок 24 – Степень рассеивания диоксидов серы от передвижного источника до ближайшей жилой застройки

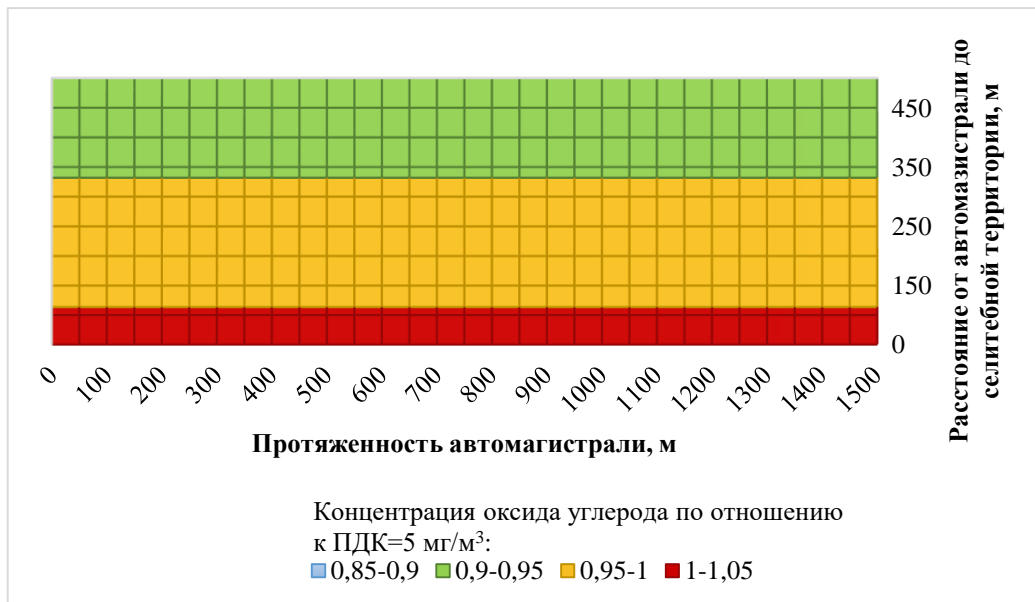


Рисунок 25 – Степень рассеивания оксида углерода от передвижного источника до ближайшей жилой застройки

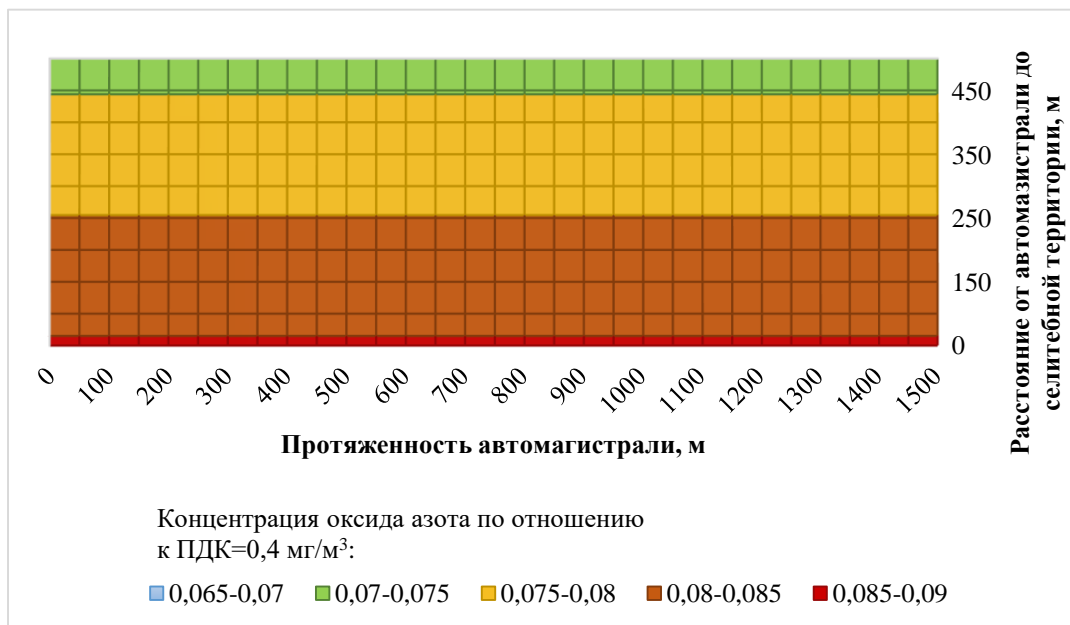


Рисунок 26 – Степень рассеивания оксидов азота от передвижного источника до ближайшей жилой застройки

Наложим данные зависимости на карту исследуемой территории (рисунки 27-30).



Рисунок 27 – Карта уровня загрязнения атмосферного воздуха взвешенными веществами

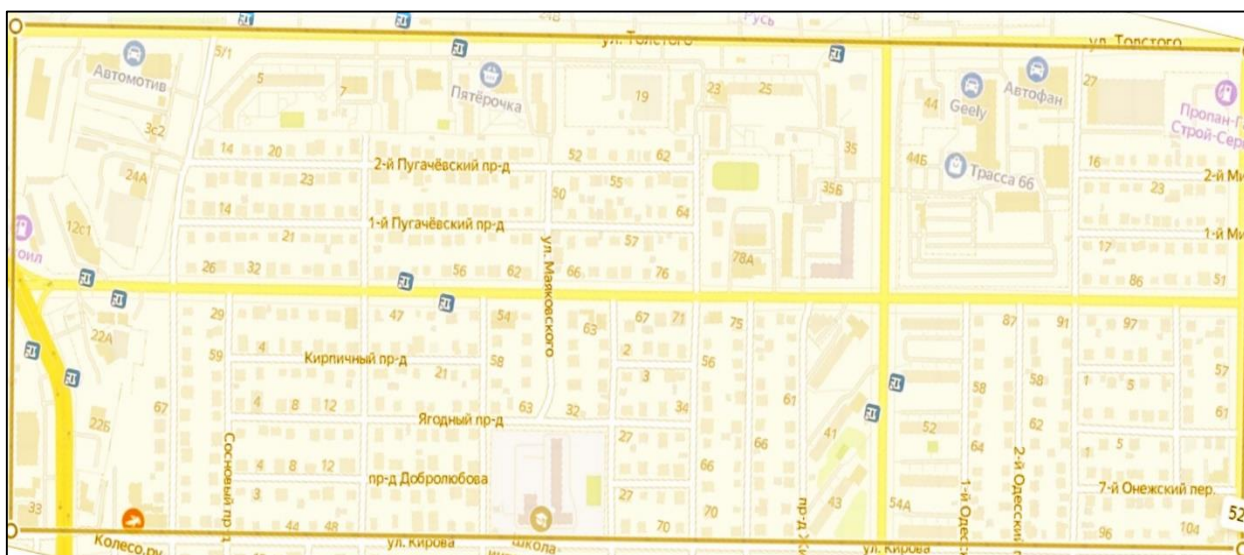


Рисунок 28 – Карта уровня загрязнения атмосферного воздуха диоксидом углерода



Рисунок 29 – Карта уровня загрязнения атмосферного воздуха оксидом углерода



Рисунок 30 – Карта уровня загрязнения атмосферного воздуха оксидом азота

Составим алгоритм создания регрессионной модели анализа качества атмосферного воздуха (рисунок 31).



Рисунок 31 – Алгоритм регрессионной модели качества атмосферного воздуха



Вывод по главе 3: разработана математическая регрессионная прогностическая модель для обеспечения прогноза загрязнения селитебной территории исходя из выбранных предикторов. При составлении математической модели использован следующий алгоритм – это анализ исходных данных, а именно определение предикторов и пределы их изменения, в данной работе определено 6 предикторов (температура воздуха, скорость ветра, влажность воздуха, высота заграждений, расстояние от дороги, интенсивность автомобилей) и установлены пределы их изменения.

На основе используемой регрессионной модели были рассчитаны параметры, а именно коэффициенты, для чего необходимо было составить план полного факторного эксперимента. Данные для получения результатов эксперимента принимались на основе экспериментальных данных лаборатории НАЦ «Физико-химических и экологических исследований» за последние три года. Коэффициенты на значимость проверялись по критерию Стьюдента. Уравнение регрессии, полученное после определения значимых параметров, проверялось на адекватность по критерию Фишера, а незначимые коэффициенты были исключены из самого уравнения регрессии.

Полученная прогностическая модель при факторах, меняющихся в заданных пределах, может использоваться на селитебной территории вблизи автомагистралей и полностью давать оценку уровню загрязнения на данной территории.

В целом модель может заменить и автоматизированные системы контроля качества атмосферного воздуха, и работу передвижной экологической лаборатории на данной территории. Но для непрерывности формирования базы данных и более тщательного анализа в дальнейшем необходимо установить датчики метрологического контроля на исследуемых территориях и возможно вести в открытом доступе интенсивность загрузки дорог, а также рассматривать и параметры загрязнения атмосферного воздуха такие как оксид углерода, оксид азота, диоксид серы и взвешенные вещества.

В дальнейшем в работе будет рассмотрена необходимость и обоснованность размещения автоматизированных систем контроля качества атмосферного воздуха вдоль автомобильных дорог и их количество.

Также на основе математической прогностической модели составлены зависимости распространения загрязняющих веществ на жилую территорию.

В дальнейшем данные математическую модель можно использовать для прогноза без проведения инструментальных исследований, математическая модель проверена на адекватность согласно следующей гипотезе: линейная модель по параметрам удовлетворительно описывает экспериментальные данные (критерий Фишера).

Согласно представленным зависимостям, продемонстрировали, что полученные закономерности отображают основные закономерности процесса турбулентной диффузии и могут быть использованы в указанных интервалах факторов.

## Глава 4 Предложения по оптимизации системы автоматизированного мониторинга качества атмосферного воздуха на автотранспортных магистралях г.о. Тольятти.

Измерения – основа наблюдений. Для регулирования качества атмосферного воздуха необходима оценка регулирования прогнозируемого состояния окружающей среды согласно измерениям.

Пространственная организация сети слежения может быть построена на основе точечных измерений (на станциях), включая дистанционные наблюдения, или на основе площадных съемок и получения интегральных показателей.

Существующая сеть станций измерения качества воздуха позволяет осуществить мониторинг на уровне города, района или в ближней окрестности станции.

Оборудование и стоимость мониторинга представлена на рисунке 32.

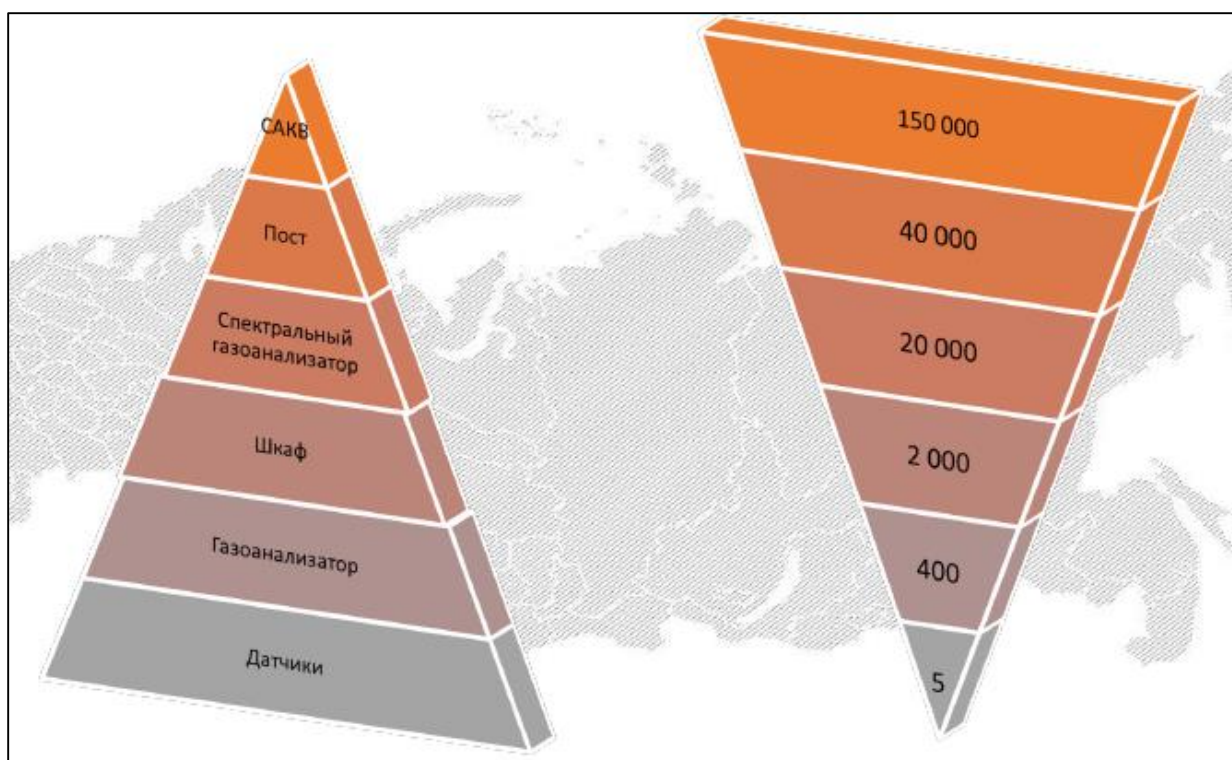


Рисунок 32 – Средства, использующие для мониторинга качества атмосферного воздуха

По результатам расчетной части следует сделать вывод, что городу, помимо стационарных постов наблюдения за качеством атмосферного воздуха, необходимы мобильные устройства, осуществляющие мониторинг АВ в непрерывном режиме.

Например, малогабаритный пост мониторинга параметров качества атмосферного воздуха (рисунок 33) предназначен для автоматического и непрерывного измерения различных параметров, характеризующих качество атмосферного воздуха и передачи полученной информации на сервер для отображения, обработки и хранения.

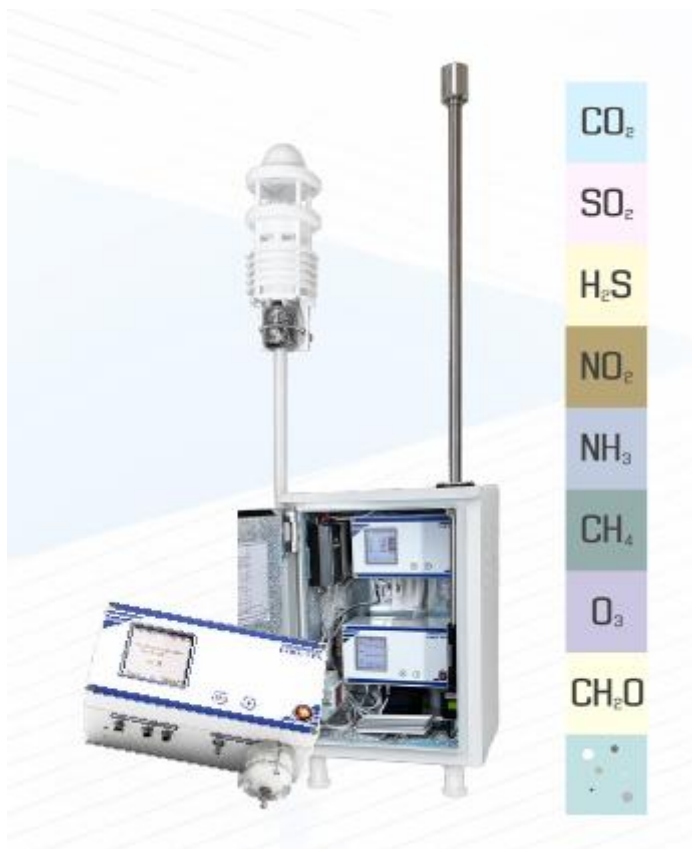


Рисунок 33 – Малогабаритный пост НПО ГАНК

По сравнению с классическими стационарными постами мониторинга, малогабаритный пост является более энергоэффективным и мобильным. В таблицу 29 сведены сравнительные параметры стационарного поста наблюдения и малогабаритного.

Таблица 29 – Сравнительный анализ постов наблюдения

Стационарный пост наблюдения	Малогабаритный пост наблюдения
Селективность	Высокоточные целевые сенсоры. Калибровка по пяти контрольным точкам.
Погрешность и стабильность показаний; Влияние параметров внешней среды	Зонд отбора пробы «Атмосфера». Система поддержания микроклимата. Блок пробоподготовки. Принудительный метод отбора пробы.
Влияние анализируемой среды; Дополнительная погрешность	Контроль параметров анализируемой пробы. Герметичный газовый тракт. Система продувки пробоотборной линии по команде оператора. Осушитель и увлажнитель пробы.
Дрейф «0»	Система дистанционной калибровки «0»

Типовой состав малогабаритного поста (рисунок 34):

- пробоотборный зонд Атмосфера;
- термошкаф, в который устанавливается все оборудование;
- оборудование поддержания микроклимата внутри термошкафа;
- система пробоподготовки (влагоотделитель, осушитель, насос);
- газоанализаторы ГАНК-4 (внесены в реестр СИ);
- блок продувки пробоотборного тракта «нулевым воздухом»;
- система управления и беспроводной передачи данных;
- метеостанция;
- ИБП;
- различное измерительное оборудование (дозиметры, шумомеры и тд.).



Рисунок 34 – Типовой состав малогабаритного поста

Данные посты активно используются на территории РФ, в таких городах как Гатчина, Московская область (Ленинский район), Рязанская область, Удмуртская республика, а также в Республике Казахстан (Павлодарская область).

Мобильный пост экологического мониторинга «Экобот Лаборант» (рисунок 35) предназначен для экологического и охранного патрулирования различных объектов инфраструктуры.

Передвижной пост контроля качества воздуха представляет собой газоаналитическую систему на базе блока газоанализаторов, установленных на самоходное шасси (рисунок 36).



Рисунок 35 - Мобильный пост экологического мониторинга «Экобот Лаборант»

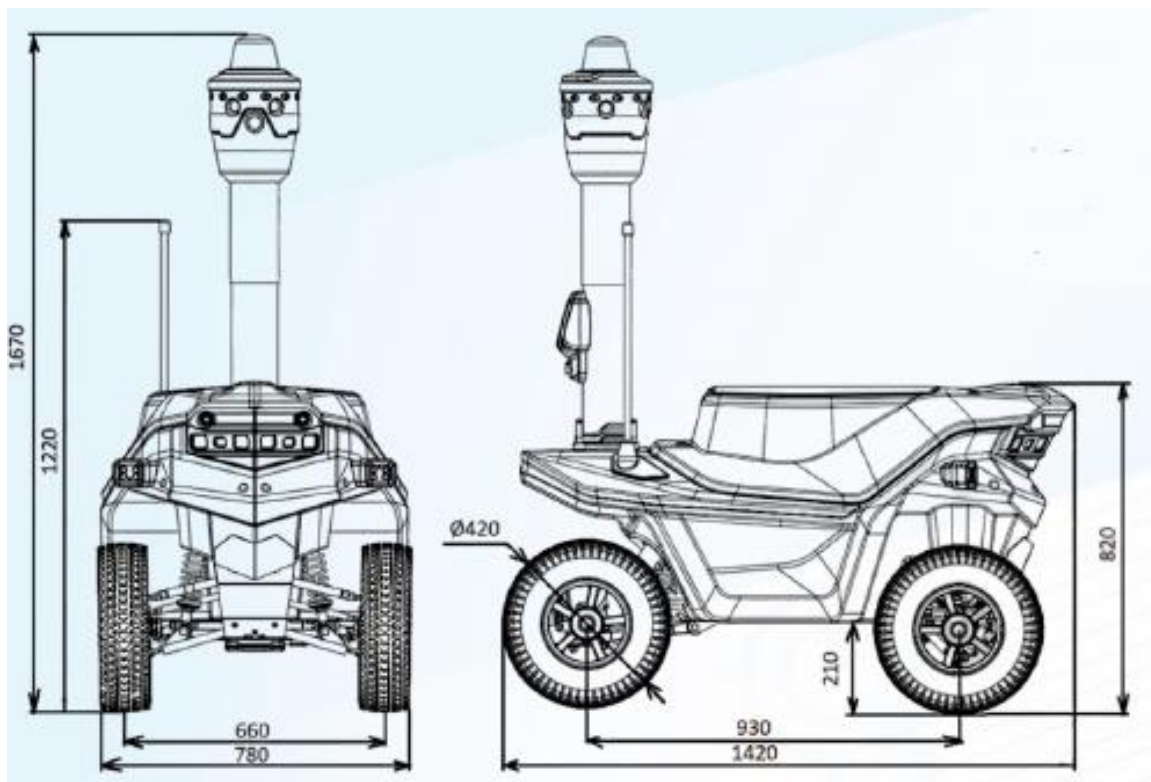


Рисунок 36 – Чертеж мобильного поста экологического мониторинга «Экобот Лаборант»

#### Задачи передвижного поста:

- непрерывное автоматическое измерение концентрации вредных веществ и взвешенных частиц в атмосферном и воздухе рабочей зоны;
- измерения метеорологических параметров (опционально);
- оповещение персонала (оператора) об аварийной ситуации при достижении ПДК загрязняющих веществ;
- хранение и передача данных измерений концентраций вредных веществ и метеопараметров в базу данных на сервере в реальном времени.

#### Рабочие параметры:

- количество определяемых компонентов – до 16 одновременно;
- запас хода (при движении по асфальту) - до 20км;
- типовая скорость - от 4 до 6 км/ч;
- степень защиты корпуса – IP65;
- рабочая температура от -25 до +50 (от -40 до +45 исп. «Север»);
- беспроводная связь 3G/4G.

#### Состав оборудования:

- автономная мобильная платформа
- газоанализаторы ГАНК-4
- метеостанция (опционально)
- зонд отбора пробы «Атмосфера»

#### Возможности самоходного шасси:

- управление оператором удалённо;
- программа прокладки маршрута;
- спутниковая навигационная система;
- обнаружение и объезд препятствий;
- дистанционное программирование и редактирование маршрута патрулирования;
- акустический контроль и звуковое оповещение:
- микрофон, интерком, кнопка вызова оператора;



- задний привод (полный опционально).

Преимуществами данного мобильного поста экологического мониторинга является:

- мобильный пост экологического мониторинга ГАНК включен в реестр СИ РФ;
- беспроводная передача данных;
- уникальный перечень веществ;
- малогабаритное исполнение системы Атмосфера;
- один переносной прибор на атмосферу, рабочую зону и промышленные выбросы;
- контроль до 30 веществ.

ПАК «ЭйрНод» - большая станция в маленькой коробке (рисунок 37) включает в себя следующее:

- достоверность данных в любых погодных условиях;
- простота и эффективность эксплуатации;
- достоверность данных в любых погодных условиях;
- термоизоляция корпуса;
- модуль пробоподготовки;
- устранение влияния неизмеряемых компонентов;
- корректировка базовой линии;
- отсутствие постобработки данных измерений;
- надежность, длительный срок службы (не менее 5 лет);
- наработка на отказ 24 000 часов;
- модуль питания и передачи данных: ИБП 12-24 часа, трехступенчатая защита (импульсные перенапряжения, выход напряжения за диапазон);
- постоянный мониторинг данных и параметров ПАК;
- автоматическая диагностика состояния оборудования;
- удаленное обслуживание и решение большинства задач;



Рисунок 37 – ПАК «ЭйрНод»

Для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха в городе карта города покрывается регулярной расчетной сеткой (рисунок 38). Шаг сетки принят  $1000 \times 1000$  м для оптимизации работы всего программного комплекса. Каждый квадрат характеризуется своим уровнем загрязнения по каждому загрязняющему веществу. Загрязнение в квадратах с расположенными в них постами характеризуется уровнями загрязнения, получаемыми с этих постов.

Квадраты, в которых отсутствуют посты наблюдения, разбиваются дополнительно сеткой  $10 \times 10$  м, в узловых точках которых рассчитываются значения концентраций по каждому загрязняющему веществу, создаваемые источниками выбросов, при различных сочетаниях метеорологических условий (см. главу 3 рис. 27-30).

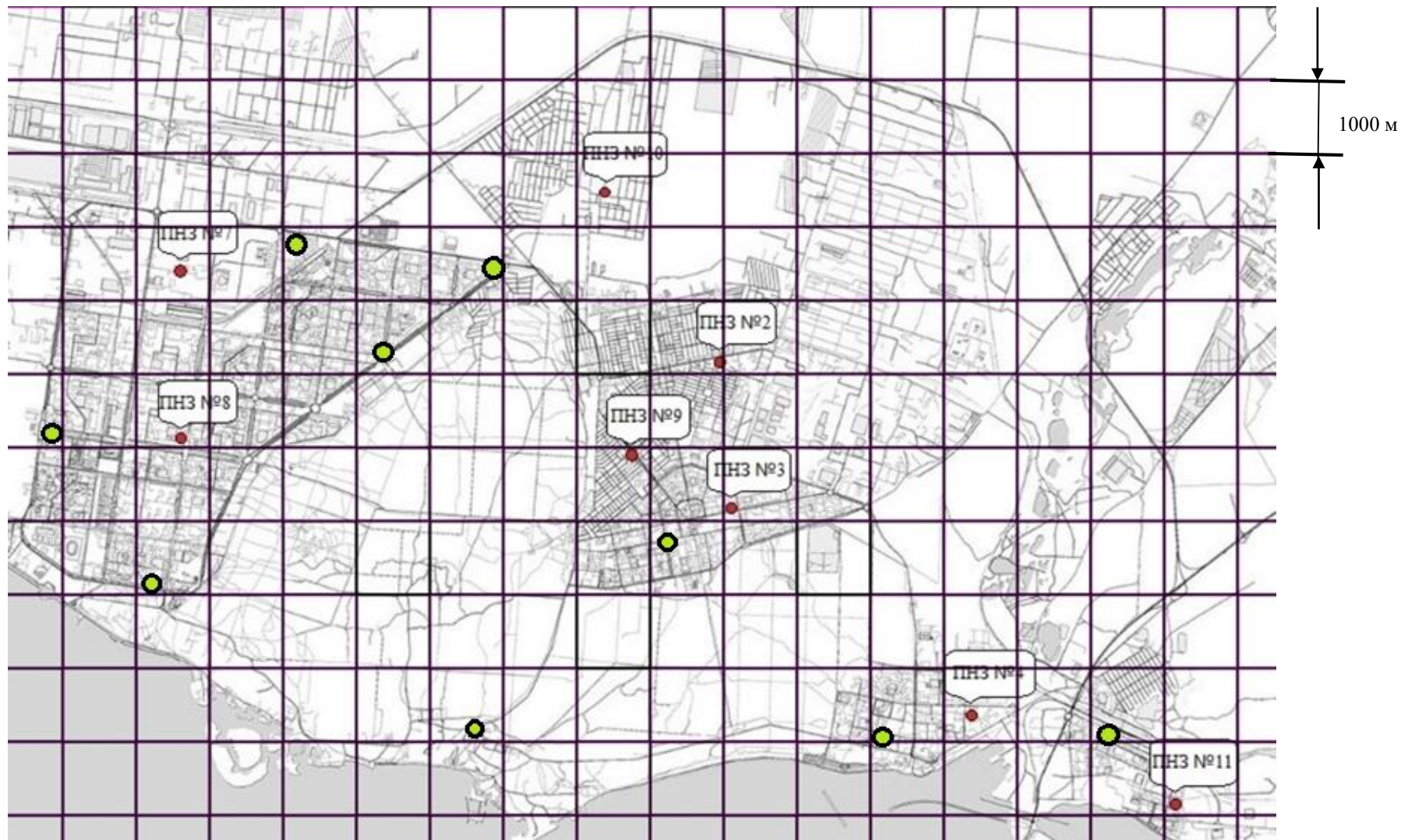


Рисунок 38 – Расчетная регулярная сетка на примере г.о. Тольятти, в которой зеленым цветом показано необходимое количество мобильных постов экологического мониторинга

Вывод по главе 4: необходимо формирования системы цифрового мониторинга на основе внедрения автоматизированного экологического мониторинга качества атмосферного воздуха для размещения вдоль автомобильных дорог относительно предложенной на рисунке 38 расчетной регулярной сетки, то есть по городу Тольятти необходимо установить еще как минимум 9 мобильных постов контроля качества атмосферного воздуха.

Стоимость одного датчика будет зависеть относительно контролируемых параметров. Их стоимость непрерывно меняется, исходя из нестабильности рынка и рыночных цен, поэтому в работе экономическая оценка затрат на установление датчиков не проводилась, но обоснованность требований к ним, а также их количество выполнялось.

Необходимо также учитывать, что система автоматизированного контроля качества встраивается в общую систему цифрового мониторинга городского округа Тольятти, поэтому в стоимость датчиков входит не только контролируемые параметры загрязнения окружающей среды, но и метеоусловия и другие указанные ранее параметры, от которых будет зависеть формирование затрат в целом на всю систему экологического цифрового мониторинга.

## Заключение

На основе анализа природоохранного и ресурсного законодательства можно сделать вывод, что требования к перечню загрязняющих веществ и их контролю осложняется некими противоречиями в самой нормативно-правовой базе, тем не менее качество атмосферного воздуха остается основной приоритетной задачей политики правительства в области охраны окружающей среды и здоровье населения.

Анализ существующей системы экологического мониторинга на территории города Тольятти определил перечень загрязняющих веществ и в целом количественный и качественный их состав, отсутствие определенной системности в определении постов наблюдения и их отсутствие в принципе в местах автомагистралей на жилых зонах территории города Тольятти. Не определено отдельное внимание по отношению к передвижным источникам, поэтому в исследовании определен перечень приоритетных загрязняющих веществ от передвижных источников автомагистралей селитебных территорий вблизи жилых застроек и физические факторы, которые способствуют их распространению.

Проведен анализ существующих моделей по распространению загрязняющих веществ и возможного их использования для формирования прогностической модели с целью оценки качества атмосферного воздуха оценки загрязнения от передвижных источников выбросов, метеорологических и физических факторов.

Обоснован выбор регрессионного анализа для формирования прогностической модели загрязнения атмосферного воздуха от передвижных источников автомагистралей жилых территорий, а также обоснован выбор предикторов, которые будут входить в данную прогностическую модель и определена территория для формирования непосредственно прогностической модели.

Составлена прогностическая модель с учетом предикторов от передвижных источников на основе экспериментальных данных лаборатории НАЦ «Физико-химических и экологических исследований» за последние три года.

При использовании математической прогностической модели составлены примеры зависимостей распространения загрязняющих веществ на жилую территорию. Согласно представленным зависимостям, продемонстрировали, что полученные закономерности отображают основные закономерности процесса турбулентной диффузии и могут быть использованы в указанных интервалах факторов.

В дальнейшем данные математическую модель можно использовать для прогноза без проведения инструментальных исследований, математическая модель проверена на адекватность согласно следующей гипотезе: линейная модель по параметрам удовлетворительно описывает экспериментальные данные (критерий Фишера).

Предложено внедрение дополнительных мобильных постов контроля качества атмосферного воздуха в существующую систему автоматизированного экологического мониторинга.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Антропов К.М., Казмер Ю.И., Вараксин А.Н. Описание пространственного распределения загрязнения атмосферного воздуха промышленного центра методом Land Use Regression (обзор). Екатеринбург 2012 г.
2. Антропов К.М. Математические модели загрязнения атмосферного воздуха мегаполиса и промышленного центра выбросами автотранспорта и промышленных предприятий. Автореферат диссертации на соискание учётной степени кандидата физико-математических наук. Екатеринбург, 2012 г.
3. Голованов А.А. Комплексное определение состава атмосферного воздуха в городском округе Тольятти (Исследования атмосферного воздуха с целью выявления и идентификации специфических загрязнителей в атмосферном воздухе с использованием методов термодесорбционной хромато-масс-спектрометрии и других методов физико-химического анализа). Отчет о научно-исследовательской работе (итоговый). Тольятти 2020 г. 183 с.
4. Иванова Ю.П., Надер Б.Ю., Мишаков В.А., Шаповалова Ю.А., Иванова О.О., Азаров В.Н. Влияние метеорологических условий на рассеивание вредных выбросов в городской среде. Инженерный вестник Дона. №1 2020 г.
5. Кравцова М.В. Моделирование технических и природных систем: учеб-методич. Пособие. Тольятти: изд-во, 2016 – 310 с.
6. Невмержицкий Н.В. Методика оценки и прогнозирования экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM10 и PM2.5. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2016 г.
7. Пепина Л.А., Созонтова А.Н. Загрязнение атмосферного воздуха автомобильно-дорожным комплексом. Обзорная статья в журнале ALFABUILD, 2017 г., стр. 99-110

8. Холоднов В.А., Решетиловский В.П., Лебедева М.Ю., Боровинская Е.С. Системный анализ и принятие решений. Компьютерное моделирование и оптимизация объектов химической технологии в mathcad и excel. [Текст]: учебное пособие / В.А.Холоднов, В. П. Решетиловский, М.Ю.Лебедева, Е. С. Боровинская. СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2007.-425 с.
9. Гауссовские модели распространения загрязнений в атмосфере. [Электронный ресурс] URL: [https://studref.com/667428/ekologiya/kaussovskie\\_modeli\\_rasprostraneniya\\_zagryazneniy\\_atmosfere](https://studref.com/667428/ekologiya/kaussovskie_modeli_rasprostraneniya_zagryazneniy_atmosfere) (дата обращения 12.01.2023).
10. Загрязнение воздуха автомобилями [Электронный ресурс] URL: <https://ecologanna.ru/ekologicheskie-problemy/zagryaznenie-vozduha-avtomobilyami> (дата обращения 12.01.2023).
11. Загрязнение воздуха. [Электронный ресурс] URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Загрязнение\\_воздуха](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Загрязнение_воздуха) (дата обращения 12.01.2023).
12. Качество воздуха в России. Индекс качества воздуха (AQI) и загрязнение атмосферы PM2.5 в России. [Электронный ресурс] URL: <https://www.iqair.com/ru/russia> (дата обращения 12.01.2023).
13. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях от 30.12.2001 N 195-ФЗ (ред. от 28.04.2023). [Электронный ресурс] URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34661/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34661/) (дата обращения 12.01.2023).
14. Математические модели распространения примесей в воздухе от точечных источников. [Электронный ресурс] URL: <https://present5.com/matematicheskie-modeli-rasprostraneniya-primesej-v-vozduxe-ot/> (дата обращения 12.01.2023).
15. Общие представления о моделировании загрязнения атмосферы. [Электронный ресурс] URL: [https://studme.org/135921/ekologiya/obschie\\_predstavleniya\\_modelirovanii\\_zagryazneniya\\_atmosfery](https://studme.org/135921/ekologiya/obschie_predstavleniya_modelirovanii_zagryazneniya_atmosfery) (дата обращения 12.01.2023).



16. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" (с изменениями на 30 декабря 2022 года). [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения 12.01.2023).

17. Постановление Правительства РФ от 18.09.2020 № 1496 (ред. от 30.12.2020) «О признании утратившими силу некоторых актов и отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации, об отмене некоторых нормативных правовых актов федеральных органов исполнительной власти, содержащих обязательные требования, соблюдение которых оценивается при проведении мероприятий по контролю при осуществлении государственного экологического надзора». [Электронный ресурс] URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_363081/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_363081/) (дата обращения 15.05.2023).

18. Постановление Правительства РФ от 30.06.2021 № 1096 (ред. от 26.02.2022) «О федеральном государственном экологическом контроле (надзоре)» (вместе с «Положением о федеральном государственном экологическом контроле (надзоре)») (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022). [Электронный ресурс] URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_389259/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_389259/) (дата обращения 15.05.2023).

19. Постановление Правительства РФ от 10.03.2023 № 372 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации и признании утратившим силу отдельного положения акта Правительства Российской Федерации». [Электронный ресурс] URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_442296/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_442296/) (дата обращения 15.05.2023).

20. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 30 июля 2020 г. № 524 «Об утверждении требований к проведению наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением». [Электронный ресурс]

URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74948136/> (дата обращения 15.05.2023).

21. Приказ Росприроднадзора от 30.12.2020 № 1839 (ред. от 11.04.2023) «Об утверждении перечня нормативных правовых актов (их отдельных положений), содержащих обязательные требования». [Электронный ресурс] URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_374271/2ff7a8c72de3994f30496a0ccb1ddafdaddf518/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_374271/2ff7a8c72de3994f30496a0ccb1ddafdaddf518/) (дата обращения 15.05.2023).

22. Список городов России с наибольшим уровнем загрязнения атмосферного воздуха. [Электронный ресурс] URL: [http://voeikovmgo.ru/?option=com\\_content&view=article&id=1047&Itemid=236&lang=ru](http://voeikovmgo.ru/?option=com_content&view=article&id=1047&Itemid=236&lang=ru) (дата обращения 12.01.2023).

23. Уровни загрязнения атмосферного воздуха. [Электронный ресурс] URL: <https://ria.ru/20090916/185297779.html> (дата обращения 12.01.2023).

24. Федеральный закон «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации» от 31.07.2020 № 248-ФЗ (последняя редакция). [Электронный ресурс] URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_358750/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_358750/) (дата обращения 15.05.2023).

25. Федеральный закон «О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля» от 26.12.2008 № 294-ФЗ (последняя редакция). [Электронный ресурс] URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_83079/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_83079/) (дата обращения 15.05.2023).

26. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ (последняя редакция). [Электронный ресурс] URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34823/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/) (дата обращения 15.05.2023).

27. Aarthi A., Gayathri P., Gomathi N.R., Kalaiselvi S., Gomathi Dr.V. Air quality prediction through regression model. International journal of scientific & technology research volume 9, issue 03, march 2020. 923-928.
28. Leelossy Á., Molnár Jr. F., Izsák F., Havasi Á., Lagzi I., Mészáros R. Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. Cent. Eur. J. Geosci. 6(3), 2014, 257-278.
29. Rybarczyk Y., Zalakeviciute R. Regression models to predict air pollution from affordable data collections. Machine Learning - Advanced Techniques and Emerging Applications. September 2018.
30. Trenchevski A., Kalendar M., Gjoreski H., Efnusheva D. Prediction of air pollution concentration using weather data and regression models. Proc. of the 8th International Conference on Applied Innovations in IT, (ICAIIIT), March 2020. 55-61.
31. Yan Ji Regression analysis of air pollution and pediatric respiratory diseases based on interpretable machine learning. Front. Earth Sci., 01 March 2023.