МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГУМАНИТАРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ЮУрГГПУ»)

ФАКУЛЬТЕТ ЕСТЕСТВЕННОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ
КАФЕДРА ГЕОГРАФИИ, БИОЛОГИИ И ХИМИИ

Особенности влияния городского общественного транспорта на окружающую среду Челябинска

Выпускная квалификационная работа по направлению
05.03.06 Экология и природопользование
Направленность программы бакалавриата
«Природопользование»
Форма обучения очная

Проверка на объем заимствований:
90,77 % авторского текста

Работа рекомендована к защите
рекомендована/не рекомендована
«15» 05 2026 г.
Зав. кафедрой географии, биологии и химии
_____ Малаев А.В.

Выполнила:
Студентка группы ОФ-423/058-4-1
Кривошеева Алиса Владиславовна
_____

Научный руководитель:
кандидат географических наук, доцент
_____ Шерстобитов Юрий Валерьевич

Челябинск
2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ..... 4

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА НА ЭКОЛОГИЮ ГОРОДА..... 7

1.1. Общественный транспорт как фактор воздействия на окружающую среду городов 7

1.2. Классификация общественного транспорта..... 10

1.3. Экологические требования к общественному транспорту 20

1.4. Сравнительная характеристика общественного транспорта с точки зрения экологического воздействия 26

1.5. Характеристика выбросов парниковых газов и уровней шума в зоне влияния маршрутной сети..... 31

Выводы по первой главе……....34

ГЛАВА 2. ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЧЕЛЯБИНСКА И АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ 36

2.1. Физико-географические детерминанты состояния биосферы Челябинского промышленного узла 36

2.2. Современное состояние и динамика парка общественного транспорта города..... 42

2.3. Методика исследования загрязнения атмосферного воздуха от общественного транспорта города Челябинска..... 46

2.4. Методика исследования шумового загрязнения окружающей среды от общественного транспорта города Челябинска..... 50

Выводы по второй главе……....57

ГЛАВА 3. МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА НА ЭКОСФЕРУ ГОРОДА ЧЕЛЯБИНСК..... 59

3.1. Пространственная дифференциация химического загрязнения в зонах влияния транспортных развязок 59
3.2. Оценка акустического загрязнения от общественного транспорта и его влияния на селитебные территории 67
3.3. Программа природоохранных мероприятий по модернизации транспортного комплекса мегаполиса 74
Выводы по третьей главе……..…….....78
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 80
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 83

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования обусловлена стремительным ростом урбанизированных территорий в Российской Федерации и связанным с этим усилением антропогенной нагрузки на природные комплексы крупных городов. Челябинск как один из крупнейших промышленных центров Уральского региона характеризуется высокой концентрацией источников техногенного воздействия, среди которых общественный транспорт занимает особое место в структуре экологических рисков. По данным Государственного доклада о состоянии окружающей среды в Челябинской области, вклад автотранспорта в суммарный объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух городских территорий достигает 30% в селитебных зонах.

Общественный транспорт, включающий автобусные, троллейбусные и трамвайные маршруты, обеспечивает основную часть пассажирских перевозок в городе и формирует специфический каркас экологической нагрузки, распределенной вдоль транспортных магистралей и узловых развязок. Современные требования к устойчивому развитию городских территорий, закрепленные в Федеральном законе №7-ФЗ «Об охране окружающей среды», предполагают необходимость комплексной оценки воздействия транспортных систем на компоненты природной среды с учетом пространственной дифференциации загрязнения и особенностей ландшафтно-экологической структуры конкретной территории. Оценка экологического состояния урбоэкосистем в зонах влияния общественного транспорта приобретает особое значение в контексте реализации национальных проектов «Экология» и «Безопасные качественные дороги», направленных на снижение негативного воздействия на окружающую среду и повышение качества жизни населения.

Степень разработанности проблемы в отечественной науке характеризуется значительным массивом исследований, посвященных оценке воздействия автотранспорта на атмосферный воздух городов. В последние десятилетия активно развиваются исследования, включающие комплексную оценку экологического состояния урбанизированных территорий. Вместе с тем, специфика воздействия общественного транспорта на природные комплексы конкретных промышленных центров Урала остается недостаточно изученной, что определяет научную и практическую значимость настоящего исследования.

Цель работы – определение влияния общественного транспорта Челябинска по результатам мониторинга уровня шума и качества воздуха.

Для реализации поставленной цели решались следующие **задачи:**

1. Проанализировать теоретические и нормативно-правовые аспекты эколого-географического анализа транспортных систем, систему нормативов, определяющих уровни возможного воздействия звукового и воздушного загрязнения на городскую среду и человека.

2. Провести эколого-географический анализ территории Челябинска, изучить структуру и динамику парка общественного транспорта.

3. Провести статистический анализ данных мониторинга состояния атмосферного воздуха и шумового фона на основе данных за весенний период 2026 года.

Объект исследования: система городского общественного транспорта города Челябинска.

Предмет исследования: воздействие городского общественного транспорта города Челябинска на окружающую среду.

Методы исследования включают теоретические основы геоэкологии, ландшафтоведения, экологического нормирования и мониторинга

окружающей среды. В работе применены инструментальные методы определения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе с использованием газоанализаторов, методы инструментальной оценки уровня шума, расчетные методы оценки валовых выбросов от автотранспорта и результаты собственных полевых исследований.

Научная новизна исследования заключается в комплексном исследовании, которое актуализирует методику исследования шумового и воздушного загрязнения Челябинска, кроме того, особое внимание уделено общественному транспорту.

Практическая значимость определяется возможностью использования материалов исследования, которые могут быть предоставлены органам региональной власти и муниципалитетам при разработке мероприятий по снижению уровня шума от городского общественного транспорта.

Структура работы. Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА НА ЭКОЛОГИЮ ГОРОДА

1.1. Общественный транспорт как фактор воздействия на окружающую среду городов

Общественный транспорт представляет собой важнейший элемент инфраструктуры современных урбанизированных территорий, обеспечивающий функционирование городских систем и определяющий качество жизни населения. Вместе с тем, эксплуатация транспортных средств сопровождается существенным воздействием на компоненты природной среды, что определяет актуальность изучения экологических аспектов функционирования транспортных систем в контексте устойчивого развития городов. Научное направление, связанное с оценкой воздействия транспорта на окружающую среду, активно развивается в отечественной науке с середины XX в., когда стремительная автомобилизация городов потребовала разработки методов прогнозирования и нормирования транспортных выбросов [24].

Общественный транспорт как специфический фактор экологического воздействия характеризуется рядом особенностей, отличающих его от частного автомобильного транспорта. Во-первых, маршрутная сеть общественного транспорта формирует устойчивые зоны повышенной антропогенной нагрузки вдоль основных транспортных магистралей, где концентрация загрязняющих веществ в атмосферном воздухе систематически превышает фоновые значения. Во-вторых, режим эксплуатации транспортных средств общественного пользования отличается высокой интенсивностью и регулярностью, что обусловливает постоянный характер воздействия на природные комплексы прилегающих территорий. В-третьих, техническое состояние парка общественного транспорта, особенно в средних и малых

городах России, часто не соответствует современным экологическим стандартам, что усугубляет негативное воздействие на окружающую среду [33].

Основные виды воздействия общественного транспорта на компоненты природной среды урбанизированных территорий включают загрязнение атмосферного воздуха выбросами отработавших газов двигателей внутреннего сгорания, акустическое загрязнение селитебных территорий, вибрационное воздействие на здания и сооружения, загрязнение поверхностных вод и почв нефтепродуктами, тяжелыми металлами и противогололедными реагентами.

Специфика воздействия общественного транспорта на атмосферный воздух определяется качественным и количественным составом выбросов загрязняющих веществ, формирующихся при сгорании моторного топлива в двигателях различных типов. Основными компонентами отработавших газов являются оксид углерода, углеводороды, оксиды азота, твердые частицы, диоксид серы, бенз(а)пирен и другие полициклические ароматические углеводороды. Соотношение этих веществ в выбросах существенно различается для транспортных средств с бензиновыми и дизельными двигателями, что необходимо учитывать при оценке суммарной экологической нагрузки от парка общественного транспорта города [8].

Пространственная структура загрязнения атмосферного воздуха в зонах влияния транспортных магистралей формируется под действием комплекса факторов, включающих интенсивность движения транспортных средств, их техническое состояние и режим эксплуатации, метеорологические условия, характер городской застройки и рельеф местности.

Акустическое загрязнение представляет собой второй по значимости вид воздействия общественного транспорта на городскую среду. Транспортный шум формируется в результате работы двигателей,

взаимодействия колес с дорожным покрытием, аэродинамических процессов при движении транспортных средств. Уровни звукового давления на территориях, прилегающих к дорогам с интенсивным движением общественного транспорта, систематически превышают предельно допустимые значения, установленные СанПиН 1.2.3685-21 для различных функциональных зон города. Длительное воздействие повышенных уровней шума приводит к негативным физиологическим эффектам у населения, включая нарушения сна, повышение артериального давления, снижение работоспособности и концентрации внимания [31].

Механизмы воздействия транспортных выбросов на здоровье человека и состояние природных комплексов достаточно подробно изучены в работах отечественных и зарубежных исследователей. Оксид углерода, поступающий в организм человека при вдыхании загрязненного воздуха, связывается с гемоглобином крови, образуя карбоксигемоглобин и снижая способность крови к переносу кислорода. Это приводит к гипоксии тканей и нарушению функций центральной нервной системы, сердечно-сосудистой системы. Оксиды азота обладают раздражающим действием на слизистые оболочки дыхательных путей, способствуют развитию бронхиальной астмы и других респираторных заболеваний. Твердые частицы, особенно фракция PM2.5 с размером менее 2.5 микрометров, способны проникать в глубокие отделы легких и даже в кровоток, вызывая системные воспалительные реакции и повышая риск развития сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний [28].

Воздействие транспортных выбросов на растительность городских территорий проявляется в угнетении ростовых процессов, снижении устойчивости к неблагоприятным факторам среды, накоплении тяжелых металлов в тканях растений. Исследования, проведенные специалистами Института географии РАН, показали, что в зонах интенсивного движения

транспорта наблюдается снижение видового разнообразия растительных сообществ, замещение аборигенных видов рудеральными, устойчивыми к антропогенному воздействию. Накопление свинца, кадмия, цинка и других тяжелых металлов в почвах придорожных территорий приводит к формированию геохимических аномалий и нарушению функционирования почвенной биоты [16].

Экологическое нормирование выбросов от передвижных источников основано на концепции предельно допустимых выбросов для отдельных транспортных средств и предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Система нормирования учитывает тип двигателя, категорию транспортного средства, режим эксплуатации и техническое состояние. В соответствии с требованиями Технического регламента, новые транспортные средства, поступающие в эксплуатацию на территории России, должны соответствовать минимум экологическому классу Евро-5, что обеспечивает существенное снижение выбросов по сравнению с более ранними стандартами. Однако реальный парк общественного транспорта в большинстве российских городов характеризуется значительной долей транспортных средств с низкими экологическими классами, что определяет сохранение высокого уровня загрязнения атмосферного воздуха [13,].

1.2. Классификация общественного транспорта

Классификация общественного транспорта представляет собой важную задачу для систематизации знаний о структуре транспортных систем городов и дифференцированной оценки воздействия различных видов транспортных средств на окружающую среду. В научной литературе и нормативно-технических документах используются различные классификационные

признаки, отражающие технические, эксплуатационные и экологические характеристики транспортных средств общественного пользования. Наиболее распространенным подходом является классификация по способу получения энергии для движения и типу используемой инфраструктуры, что определяет принципиальные различия в экологических характеристиках различных видов общественного транспорта [33].

По способу получения энергии для движения общественный транспорт подразделяется на следующие основные категории:

1. Транспорт с автономными источниками энергии, использующий двигатели внутреннего сгорания, работающие на жидком или газообразном моторном топливе (автобусы с дизельными двигателями, автобусы с бензиновыми двигателями, автобусы, работающие на компримированном природном газе);

2. Электрический транспорт, получающий энергию от внешней контактной сети или аккумуляторных батарей (троллейбусы, трамваи, электробусы);

3. Гибридный транспорт, сочетающий различные источники энергии и способы ее преобразования (гибридные автобусы с комбинированной силовой установкой, троллейбусы с автономным ходом).

Автобусный транспорт с двигателями внутреннего сгорания представляет собой вид общественного транспорта, обеспечивающий высокую гибкость маршрутной сети и относительно невысокие капитальные затраты на организацию перевозок. Однако с экологической точки зрения автобусы с традиционными двигателями характеризуются наибольшими удельными выбросами загрязняющих веществ на пассажиро-километр среди всех видов городского общественного транспорта. Автобусы с дизельными двигателями отличаются более высокой топливной экономичностью по сравнению с бензиновыми, но формируют повышенные выбросы оксидов

азота и твердых частиц, которые представляют значительную опасность для здоровья населения.

Технический прогресс в области двигателестроения привел к существенному совершенствованию экологических характеристик автобусов. Внедрение систем нейтрализации отработавших газов, включающих каталитические нейтрализаторы и сажевые фильтры, позволяет снизить выбросы токсичных веществ на 70-90% по сравнению с двигателями без систем очистки. Соответствие современных автобусов экологическим стандартам Евро-5 и Евро-6 обеспечивается комплексом технических решений, включающих системы рециркуляции отработавших газов, многоступенчатые системы впрыска топлива, электронные системы управления двигателем. Переход от экологического класса Евро-3 к классу Евро-5 обеспечивает снижение выбросов оксидов азота в 3-4 раза, твердых частиц в 5-6 раз [7].

Автобусы, работающие на компримированном природном газе, получили широкое распространение в крупных городах России в рамках программ экологизации общественного транспорта. Использование природного газа в качестве моторного топлива обеспечивает существенное снижение выбросов токсичных веществ по сравнению с дизельным топливом: выбросы оксида углерода снижаются на 60-80%, углеводородов на 50-70%, твердых частиц практически до нулевого уровня. При этом выбросы оксидов азота от газовых двигателей могут превышать соответствующие показатели современных дизельных двигателей, что требует применения специальных систем нейтрализации. Важным экологическим преимуществом природного газа является отсутствие в составе отработавших газов канцерогенных полициклических ароматических углеводородов, характерных для продуктов сгорания дизельного топлива [13].

Троллейбусный транспорт представляет собой вид электрического транспорта, получающего энергию от внешней контактной сети постоянного тока напряжением 550 вольт. С экологической точки зрения троллейбусы обладают значительными преимуществами перед автобусами с двигателями внутреннего сгорания, поскольку не имеют выбросов загрязняющих веществ в месте эксплуатации. Однако при оценке совокупного воздействия на окружающую среду необходимо учитывать выбросы от электростанций, вырабатывающих электрическую энергию для питания троллейбусной сети. В условиях российской энергосистемы, где значительная доля электроэнергии производится на тепловых электростанциях, работающих на органическом топливе, совокупные выбросы парниковых газов в расчете на пассажиро-километр для троллейбусов могут быть сопоставимы с выбросами от современных автобусов с газовыми двигателями [23].

Трамвай является старейшим видом электрического общественного транспорта и сохраняет свое значение в крупнейших городах России благодаря высокой провозной способности и низким эксплуатационным расходам. Трамваи характеризуются наибольшей энергетической эффективностью среди всех видов наземного городского транспорта, что обусловлено низким сопротивлением движению при контакте стальных колес со стальными рельсами. Удельное энергопотребление трамваев в 2-3 раза ниже, чем у троллейбусов, и в 4-6 раз ниже, чем у автобусов. Экологические преимущества трамвая проявляются также в низких уровнях шума при движении современных трамвайных вагонов с резинокордными колесами и системами виброизоляции. Вместе с тем, строительство и эксплуатация трамвайных линий связаны с существенным воздействием на городскую среду, включая изъятие значительных площадей под трамвайные пути и создание барьерного эффекта для пешеходного движения [2].

Гибридные автобусы, сочетающие двигатель внутреннего сгорания с электродвигателем и аккумуляторными батареями, обеспечивают снижение расхода топлива и выбросов загрязняющих веществ до 40% по сравнению с обычными автобусами благодаря рекуперации энергии при торможении и оптимизации режимов работы двигателя. Наибольшая эффективность гибридных систем проявляется в условиях городского цикла движения с частыми остановками и разгонами, характерного для маршрутов общественного транспорта. Различают последовательную, параллельную и комбинированную схемы построения гибридной силовой установки, отличающиеся взаимодействием двигателя внутреннего сгорания и электродвигателя в различных режимах движения [13].

Классификация автобусов по вместимости и габаритам предполагает выделение следующих категорий:

1). Особо малый класс вместимостью до 10–15 пассажиров, количество сидячих мест – до 15. Длина кузова – до 5,5 м. Примерами актуальных транспортных средств, курсирующих на улицах Челябинска, являются ГАЗель NEXT, Mercedes-Benz Sprinter (рисунок 1).

2). Малый класс обладает вместимостью до 25-40 пассажиров, 15-25 сидячими местами, длиной кузова – 6-7,5 м. Актуальные примеры – ПАЗ-3205, ГАЗель City (рисунок 2).



Рисунок 1 – Автобус особо малого класса ГАЗель NEXT на 74 маршруте в Челябинске [9].



Рисунок 2 – Автобус малого класса ПАЗ-32054 на 172 маршруте в Челябинске [9].

3). Автобусы среднего класса вмещают 40-65 пассажиров, установлено 20-30 сидячих мест, длина кузова – 8-9,5 м. Примеры – ПАЗ "Вектор NEXT", Volgabus-4298 (рисунок 3).



Рисунок 3 – Автобус среднего класса Volgabus-4298 на маршруте 17а в Челябинске [9].

4). Большой класс вместимостью 60-110 пассажиров, с 25-40 местами для сидения, длина кузова – 10,5-12 м. Примеры – МАЗ-203, ЛиАЗ-5292, Volgabus-5270 (рисунок 4).



Рисунок 4 – Автобус большого класса Volgabus-4298 на маршруте 14 в Челябинске [9].

5). Особо большой класс (сочлененные автобусы) обладают вместимостью от 90-180 пассажиров, 35-45 местами для сидения, длиной кузова 16,5 м. и более. Пример – Volgabus-6271 (рисунок 5).



Рисунок 5 – Автобус особо большого класса Volgabus-6271 на маршруте 64 в Челябинске [9].

Троллейбусы в российских городах представлены преимущественно большим классом (реже ОБК), например, в Челябинске весь парк состоит из модели Синара-6254 (рисунок 6).

Односекционные трамваи (одиночные вагоны) вмещают 110-150 пассажиров, как, например, 71-625 или 71-628 в Челябинске (рисунок 7).

Многосекционные сочлененные трамваи состоят из 2 и более секций, вмещают 200–300 пассажиров, как, например, 71-638М «Альтаир» в Челябинске (рисунок 8). Трамвайные поезда из нескольких вагонов могут перевозить до 400-500 человек.



Рисунок 6 – Троллейбус Синара-6254 на маршруте 19 в Челябинске [10].



Рисунок 7 – Трамвай 71-628 в Челябинске [10].

Вместимость транспортных средств непосредственно влияет на экологическую эффективность перевозок, определяя удельные выбросы загрязняющих веществ в расчете на одного перевезенного пассажира. При прочих равных условиях использование транспортных средств большой вместимости обеспечивает снижение удельных выбросов, однако требует

наличия соответствующего пассажиропотока для эффективной загрузки. В условиях маршрутов с невысокой интенсивностью пассажиропотока применение автобусов малого и среднего класса может быть более эффективным с экологической и экономической точек зрения.



Рисунок 8 – Трамвай 71-638М в Челябинске [10].

По типу эксплуатации общественный транспорт подразделяется на муниципальный, находящийся в собственности органов местного самоуправления и эксплуатируемый муниципальными унитарными предприятиями, и коммерческий, принадлежащий частным перевозчикам и работающий на условиях концессионных соглашений или договоров на осуществление перевозок по регулируемым тарифам. Структура собственности влияет на возможности обновления парка подвижного состава и внедрения современных экологичных транспортных средств [33].

Технические характеристики, определяющие экологическую эффективность различных видов общественного транспорта, включают массу транспортного средства, мощность силовой установки, аэродинамическое сопротивление, сопротивление качению, эффективность систем рекуперации

энергии. Совершенствование этих характеристик в современных конструкциях транспортных средств обеспечивается применением легких конструкционных материалов, оптимизацией формы кузова, использованием шин с низким сопротивлением качению, внедрением систем управления энергопотреблением. Комплексное применение современных технологий позволяет снизить энергопотребление и выбросы городских автобусов на 30-50% по сравнению с транспортными средствами предыдущего поколения [19].

Нормативно-техническое регулирование экологических характеристик общественного транспорта в Российской Федерации осуществляется на основе Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств», устанавливающего требования к выбросам в соответствии с экологическими классами. Система экологической классификации транспортных средств базируется на европейских стандартах Euro и включает шесть классов от Евро-0 (транспортные средства, не соответствующие требованиям Евро-1) до Евро-5. Каждый последующий класс предусматривает ужесточение нормативов выбросов оксида углерода, углеводородов, оксидов азота, твердых частиц. С 2021 г. в России введены требования экологического класса Евро-6 для вновь выпускаемых транспортных средств, что обеспечивает гармонизацию российских стандартов с международными требованиями [27].

1.3. Экологические требования к общественному транспорту

Система экологических требований к общественному транспорту в Российской Федерации формируется на основе международных стандартов и национального законодательства, регламентирующего охрану окружающей среды и обеспечение санитарно-эпидемиологического благополучия населения. Правовой основой установления экологических требований к

транспортным средствам являются Федеральный закон №7-ФЗ «Об охране окружающей среды», Федеральный закон №96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха», Федеральный закон №52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения». Эти нормативные акты определяют общие принципы нормирования воздействия на окружающую среду, устанавливают полномочия органов государственной власти в сфере экологического контроля и надзора, закрепляют ответственность за нарушение природоохранного законодательства [15].

Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» устанавливает обязательные для применения и исполнения требования к выбросам вредных веществ с отработавшими газами двигателей транспортных средств. Регламент определяет предельные значения массовых выбросов оксида углерода, углеводородов, оксидов азота, твердых частиц для различных категорий транспортных средств в соответствии с экологическими классами. Требования дифференцированы в зависимости от типа двигателя (с принудительным зажиганием или с воспламенением от сжатия), полной массы транспортного средства, назначения транспортного средства. Для автобусов категории М3 с дизельными двигателями, соответствующих экологическому классу Евро-5, предельные значения выбросов составляют: оксид углерода не более 4.0 г/кВт·ч, углеводороды не более 0.46 г/кВт·ч, оксиды азота не более 2.0 г/кВт·ч, твердые частицы не более 0.02 г/кВт·ч [35].

Переход к более жестким экологическим стандартам осуществляется поэтапно с учетом технических возможностей производителей транспортных средств и экономических условий. С 1 января 2021 г. в Российской Федерации введены требования экологического класса 6, соответствующие европейскому стандарту Евро-6. Для дизельных двигателей автобусов экологического класса 6 предельные значения выбросов составляют: оксид

углерода не более 1.5 г/кВт·ч, углеводороды не более 0.13 г/кВт·ч, оксиды азота не более 0.4 г/кВт·ч, твердые частицы не более 0.01 г/кВт·ч, что обеспечивает снижение выбросов оксидов азота в 5 раз и твердых частиц в 2 раза по сравнению со стандартом Евро-5. Внедрение стандарта Евро-6 потребовало применения современных систем нейтрализации отработавших газов, включающих каталитические нейтрализаторы с избирательным каталитическим восстановлением оксидов азота и сажевые фильтры с системами регенерации [23].

Процедура подтверждения соответствия транспортных средств экологическим требованиям осуществляется в рамках обязательной сертификации или декларирования соответствия требованиям Технического регламента. Испытания транспортных средств на соответствие нормам выбросов проводятся в аккредитованных испытательных лабораториях по стандартизованным методикам, воспроизводящим условия городского и загородного циклов движения. Для автобусов применяется испытательный цикл, имитирующий типичный режим эксплуатации на городских маршрутах с частыми остановками и разгонами. По результатам испытаний оформляется свидетельство о безопасности конструкции транспортного средства или сертификат соответствия, подтверждающий соблюдение установленных требований [35].

Требования к качеству моторного топлива, оказывающему существенное влияние на экологические характеристики транспортных средств, установлены Техническим регламентом Таможенного союза ТР ТС 013/2011 «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту». Регламент определяет показатели качества топлива, влияющие на полноту сгорания и эффективность работы систем нейтрализации отработавших газов. Для дизельного топлива экологического класса К5,

используемого в современных автобусах, установлены жесткие требования к содержанию серы (не более 10 мг/кг), полициклических ароматических углеводородов (не более 8%), цетановому числу (не менее 51), что обеспечивает снижение выбросов твердых частиц и токсичных веществ [27].

Помимо требований к выбросам загрязняющих веществ, экологические стандарты включают нормирование шумовых характеристик транспортных средств. ГОСТ Р 51616-2014 «Автотранспортные средства. Шум, создаваемый транспортными средствами в эксплуатации. Допустимые уровни и методы измерения» устанавливает предельно допустимые уровни шума для автобусов различных категорий. Для автобусов категории М3 с полной массой более 3.5 тонн предельный уровень звука при движении составляет 80 дБА, что обеспечивается применением глушителей шума выпуска, звукоизолирующих материалов, совершенствованием конструкции двигателя и трансмиссии. Контроль соблюдения нормативов шума осуществляется при проведении периодических технических осмотров транспортных средств [20].

Санитарные требования к качеству атмосферного воздуха в зонах жилой застройки установлены СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Нормативы определяют предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест для различных периодов осреднения. Для основных компонентов выбросов автотранспорта установлены следующие нормативы: оксид углерода - максимальная разовая ПДК 5.0 мг/м³, среднесуточная ПДК 3.0 мг/м³; диоксид азота - максимальная разовая ПДК 0.2 мг/м³, среднесуточная ПДК 0.04 мг/м³; взвешенные вещества (PM10) - среднесуточная ПДК 0.06 мг/м³; взвешенные вещества (PM2.5) - среднесуточная ПДК 0.035 мг/м³; бенз(а)пирен - среднесуточная ПДК 0.000001 мг/м³. Соблюдение этих нормативов обеспечивается комплексом

мероприятий, включающих регулирование интенсивности движения транспорта, организацию санитарно-защитных зон вдоль транспортных магистралей, внедрение экологичных видов транспорта [31].

Требования к организации производственного экологического контроля на автотранспортных предприятиях установлены ГОСТ Р 56059-2014 «Производственный экологический мониторинг. Общие положения». Стандарт определяет принципы организации систематических наблюдений за состоянием окружающей среды в зоне влияния предприятия, контроля источников воздействия на окружающую среду, оценки эффективности природоохранных мероприятий. Для автотранспортных предприятий обязательным является контроль выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников (котельные, производственные участки), контроль качества топлива, учет пробега и расхода топлива транспортными средствами для расчета валовых выбросов.

Методика проведения инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для автотранспортных предприятий, утвержденная приказом Минприроды России, устанавливает порядок расчета валовых выбросов от автотранспорта с учетом пробега транспортных средств, расхода топлива, условий эксплуатации. Расчет базируется на использовании удельных показателей выбросов, дифференцированных по типам транспортных средств, экологическим классам, режимам движения. Для автобусов с дизельными двигателями экологического класса Евро-5 удельные показатели выбросов составляют: оксид углерода 1.5 г/км, углеводороды 0.2 г/км, оксиды азота 2.5 г/км, твердые частицы 0.03 г/км при движении со средней скоростью 40 км/ч. Результаты инвентаризации используются для разработки нормативов предельно допустимых выбросов и планов мероприятий по снижению выбросов [15].

Региональные и муниципальные нормативные акты могут устанавливать дополнительные экологические требования к общественному транспорту, учитывающие особенности экологической ситуации на конкретной территории. Примером таких требований являются ограничения на въезд в центральные районы городов транспортных средств, не соответствующих определенным экологическим классам, установление требований к минимальной доле электрического транспорта в структуре парка общественного транспорта, введение повышенных ставок транспортного налога для транспортных средств с низкими экологическими классами. Правовой основой для установления таких требований служат полномочия органов государственной власти субъектов Российской Федерации и органов местного самоуправления в области охраны окружающей среды, закрепленные в Федеральном законе №7-ФЗ [36].

Международные требования к экологическим характеристикам транспортных средств, установленные Правилами ЕЭК ООН, применяются в Российской Федерации в части, не противоречащей требованиям Технических регламентов Таможенного союза. Правила ЕЭК ООН №49 «Единообразные предписания, касающиеся сертификации транспортных средств в отношении выбросов загрязняющих веществ дизельными двигателями и двигателями, работающими на природном газе или сжиженном нефтяном газе» устанавливают методы испытаний и предельные значения выбросов, соответствующие стандартам Евро-6. Гармонизация российских требований с международными стандартами обеспечивает возможность выхода отечественной автотранспортной техники на международные рынки и стимулирует технологическое развитие отрасли [15].

Перспективы развития системы экологических требований к общественному транспорту связаны с внедрением стандартов Евро-7, предусматривающих дальнейшее ужесточение нормативов выбросов и

расширение перечня нормируемых веществ, включая выбросы аммиака от систем селективного каталитического восстановления, выбросы закиси азота, обладающей высоким потенциалом глобального потепления. Ожидается также введение требований к выбросам в реальных условиях эксплуатации, а не только в стандартизованных испытательных циклах, что потребует оснащения транспортных средств системами бортовой диагностики и телематическими системами мониторинга. Развитие нормативно-технической базы в области экологических требований к транспорту должно сопровождаться мерами государственной поддержки обновления парка общественного транспорта и развития инфраструктуры для альтернативных видов топлива [24].

1.4. Сравнительная характеристика общественного транспорта с точки зрения экологического воздействия

Сравнительная оценка экологических характеристик различных видов общественного транспорта представляет собой важную научно-практическую задачу для обоснования выбора оптимальных транспортных технологий при планировании развития транспортных систем городов. Методология сравнительной оценки базируется на анализе комплекса показателей, характеризующих воздействие на различные компоненты окружающей среды, с учетом полного жизненного цикла транспортных средств, включая производство, эксплуатацию и утилизацию. Наиболее распространенным подходом является сопоставление удельных показателей воздействия в расчете на единицу транспортной работы (пассажиро-километр), что позволяет учесть различия в вместимости и коэффициенте использования вместимости различных видов транспорта [24].

Основными критериями сравнительной экологической оценки общественного транспорта являются:

1. Удельные выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух в расчете на пассажиро-километр.

2. Удельные выбросы парниковых газов с учетом полного цикла производства и использования энергии.

3. Уровни шума при движении и в местах остановок.

4. Потребление невозобновляемых энергоресурсов.

5. Воздействие на почвенный покров и поверхностные воды прилегающих территорий.

Сравнительный анализ удельных выбросов загрязняющих веществ от различных видов общественного транспорта показывает существенные различия, связанные с типом используемой энергии и техническим уровнем транспортных средств. По данным исследований, удельные выбросы оксидов азота от дизельных автобусов экологического класса Евро-3 составляют 8-12 г. на пассажиро-километр, что в 15-20 раз превышает соответствующие показатели для электрического транспорта. Переход к более высоким экологическим классам обеспечивает снижение удельных выбросов: для автобусов класса Евро-5 удельные выбросы оксидов азота снижаются до 3-5 г. на пассажиро-километр, для класса Евро-6 – до 0.5-1.0 г на пассажиро-километр.

Автобусы, работающие на компримированном природном газе, занимают промежуточное положение между дизельными автобусами и электрическим транспортом по большинству показателей воздействия на атмосферный воздух. Удельные выбросы оксида углерода от газовых автобусов на 40-60% ниже, чем от дизельных автобусов, выбросы углеводородов ниже на 30-50%, выбросы твердых частиц практически отсутствуют. Вместе с тем, выбросы оксидов азота от газовых двигателей могут превышать соответствующие показатели современных дизельных двигателей с системами нейтрализации, что требует применения

каталитических нейтрализаторов. Важным преимуществом природного газа является отсутствие канцерогенных полициклических ароматических углеводородов в составе выбросов [27].

Троллейбусы и трамваи, не имея выбросов загрязняющих веществ в месте эксплуатации, обладают значительными экологическими преимуществами с точки зрения качества атмосферного воздуха в городах. Однако при оценке совокупного воздействия на окружающую среду необходимо учитывать выбросы от электростанций, производящих электроэнергию. В условиях российской энергосистемы, где около 60% электроэнергии вырабатывается на тепловых электростанциях, работающих на органическом топливе, совокупные удельные выбросы парниковых газов от электрического транспорта составляют 40-60 г эквивалента CO_2 на пассажиро-километр, что сопоставимо с показателями современных газовых автобусов (50-70 г CO_2-экв/пасс-км) и существенно ниже показателей дизельных автобусов (90-120 г CO_2-экв/пасс-км) [24].

Таблица 1 – Сравнительные показатели выбросов загрязняющих веществ от различных видов общественного транспорта. Составлено автором.

Вид транспорта	CO, г/пасс-км	NO_x, г/пасс-км	ТЧ, г/пасс-км	CO_2, г/пасс-км
Дизельный автобус Евро-3	1.5-2.0	8-12	0.3-0.5	110-130
Дизельный автобус Евро-5	0.5-0.8	3-5	0.05-0.1	95-115
Газовый автобус	0.3-0.6	4-7	0.01-0.02	90-110
Троллейбус	0	0	0	50-70
Трамвай	0	0	0	35-55

Акустическое воздействие различных видов общественного транспорта на городскую среду определяется конструктивными особенностями транспортных средств, скоростью движения, состоянием дорожного покрытия и рельсовых путей. Трамваи традиционной конструкции характеризуются высокими уровнями шума при движении, связанными с

взаимодействием стальных колес со стальными рельсами, достигающими 80-85 дБА на расстоянии 7.5 метров от оси пути. Современные трамвайные вагоны с резинокордными колесами, системами виброизоляции и звукопоглощающими материалами обеспечивают снижение уровней шума до 70-75 дБА. Троллейбусы характеризуются наименьшими уровнями шума среди всех видов наземного общественного транспорта (65-70 дБА), что обусловлено отсутствием шума от двигателя внутреннего сгорания [31].

Автобусы с дизельными двигателями создают уровни шума 75-80 дБА при движении и до 85 дБА при разгоне, что связано с работой двигателя, системы выпуска отработавших газов, взаимодействием шин с дорожным покрытием. Электробусы по акустическим характеристикам близки к троллейбусам, обеспечивая уровни шума 65-70 дБА. Важным преимуществом электрического транспорта является отсутствие низкочастотного шума от двигателя, который наиболее негативно воздействует на организм человека и хуже поглощается зданиями. Снижение акустического загрязнения в жилых районах может быть достигнуто за счет применения малошумных видов транспорта, оптимизации режимов движения, устройства шумозащитных экранов вдоль транспортных магистралей [20].

Занимаемая площадь городской территории в расчете на единицу пропускной способности транспортной системы является важным показателем эффективности использования ограниченного городского пространства. Рельсовый транспорт (трамвай) обладает преимуществом благодаря возможности организации обособленного полотна, обеспечивающего высокую скорость сообщения и провозную способность. Пропускная способность трамвайной линии составляет 15-20 тысяч пассажиров в час в одном направлении при ширине полосы отвода 6-8 метров. Троллейбусная линия при движении в общем потоке обеспечивает

пропускную способность 8-12 тысяч пассажиров в час, автобусная линия - 6-10 тысяч пассажиров в час при аналогичной ширине полосы движения [2].

Воздействие на почвенный покров и поверхностные воды прилегающих территорий от различных видов общественного транспорта связано с загрязнением нефтепродуктами, тяжелыми металлами, противогололедными реагентами. Автобусный транспорт является источником поступления в почву и воды свинца, кадмия, цинка, меди, содержащихся в продуктах износа тормозных колодок, шин, дорожного покрытия, а также нефтепродуктов от утечек топлива и масел. Концентрации тяжелых металлов в почвах придорожных территорий вдоль автомагистралей с интенсивным движением превышают фоновые значения в 5-15 раз на расстоянии до 50 метров от проезжей части. Электрический транспорт оказывает меньшее воздействие на почвы благодаря отсутствию выбросов отработавших газов, однако не исключает загрязнение от продуктов износа тормозных систем и токосъемников [16].

Таблица 2 – Сравнительные показатели энергетической эффективности и акустического воздействия общественного транспорта. Составлено автором.

Вид транспорта	**Уровень шума, дБА**	**Пропускная способность, тыс. пасс/ч**
Дизельный автобус	75-80	6-10
Газовый автобус	74-79	6-10
Троллейбус	65-70	8-12
Трамвай	70-75	15-20

Экономические аспекты сравнительной оценки различных видов общественного транспорта включают капитальные затраты на приобретение транспортных средств и создание инфраструктуры, эксплуатационные расходы, срок службы транспортных средств. Электрический транспорт характеризуется более высокими капитальными затратами на создание

инфраструктуры (контактная сеть, тяговые подстанции, рельсовые пути для трамвая), но более низкими эксплуатационными расходами благодаря меньшей стоимости электроэнергии по сравнению с моторным топливом и большему сроку службы. Расчеты показывают, что при эксплуатации в течение жизненного цикла (15-20 лет) суммарные приведенные затраты на троллейбусные и трамвайные перевозки оказываются ниже, чем на автобусные, при пассажиропотоке более 5 тысяч пассажиров в час [24].

1.5. Характеристика выбросов парниковых газов и уровней шума в зоне влияния маршрутной сети

Выбросы парниковых газов от общественного транспорта вносят значительный вклад в глобальное изменение климата и формирование городских тепловых островов. Основным парниковым газом, образующимся при сгорании моторного топлива в двигателях внутреннего сгорания, является диоксид углерода (CO_2), вклад которого в потенциал глобального потепления от транспортного сектора составляет около 75%. Остальные 25% приходятся на метан (CH_4), закись азота (N_2O), тропосферный озон и черный углерод. Метан и закись азота обладают существенно более высоким потенциалом глобального потепления по сравнению с диоксидом углерода: для метана он составляет 28, для закиси азота - 265 в расчете на 100-летний период, что означает, что одна тонна этих газов эквивалентна 28 и 265 тоннам CO_2 соответственно по вкладу в парниковый эффект [4].

Удельные выбросы диоксида углерода от автотранспорта пропорциональны расходу топлива и определяются углеродным содержанием топлива. Для дизельного топлива удельные выбросы CO_2 составляют 2.67 кг на литр сгоревшего топлива, для бензина - 2.31 кг/л, для компримированного природного газа - 2.75 кг на килограмм газа. Современный дизельный автобус

с двигателем экологического класса Евро-5 потребляет в среднем 30-40 литров топлива на 100 километров пробега, что соответствует выбросам 80-107 кг CO_2 на 100 км. При средней наполняемости автобуса 30 пассажиров удельные выбросы составляют 95-115 г CO_2 на пассажиро-километр. Автобусы на компримированном природном газе имеют сопоставимые или несколько более низкие удельные выбросы CO_2 благодаря более высокому КПД газовых двигателей [27].

Выбросы парниковых газов от электротранспорта в месте эксплуатации отсутствуют, однако при оценке полного углеродного следа необходимо учитывать выбросы от электростанций, производящих электроэнергию. Углеродная интенсивность энергии в Российской Федерации составляет в среднем 0.40-0.45 кг CO_2-экв на кВт·ч выработанной электроэнергии, что обусловлено значительной долей тепловых электростанций в структуре генерирующих мощностей. Троллейбус с удельным энергопотреблением 0.8-1.2 кВт·ч на пассажиро-километр обеспечивает косвенные выбросы 32-54 г CO_2-экв/пасс-км, что в 2-3 раза ниже, чем у дизельных автобусов. Трамвай с удельным энергопотреблением 0.4-0.6 кВт·ч/пасс-км характеризуется косвенными выбросами 16-27 г CO_2-экв/пасс-км.

Пространственное распределение выбросов парниковых газов в зоне влияния маршрутной сети общественного транспорта формируется в соответствии с конфигурацией транспортных магистралей и интенсивностью движения на различных участках. Основные транспортные артерии, по которым проходят маршруты общественного транспорта с высокой частотой движения, формируют линейные источники выбросов с удельной мощностью до 50-100 тонн CO_2 на километр в год. В узловых точках маршрутной сети, где происходит пересечение нескольких маршрутов и наблюдается повышенная концентрация транспортных средств в режимах разгона и

торможения, удельные выбросы могут возрастать в 1.5-2 раза по сравнению со средними значениями на перегонах.

Временная изменчивость выбросов парниковых газов от общественного транспорта характеризуется выраженными суточными и недельными циклами, связанными с ритмом городской жизни. Максимальные значения выбросов наблюдаются в часы пик утром (7:00-9:00) и вечером (17:00-19:00), когда интенсивность движения общественного транспорта достигает наибольших значений. В эти периоды выбросы могут превышать среднесуточные значения в 1,5-2 раза. В выходные суммарные выбросы от общественного транспорта обычно на 20-40% ниже, чем в рабочие дни, что связано с сокращением маятниковых передвижений населения [14].

Акустическое загрязнение в зоне влияния маршрутной сети общественного транспорта представляет собой значимый фактор воздействия на здоровье населения и комфортность проживания в городской среде. Транспортный шум формируется в результате работы силовых установок, взаимодействия колес с дорожным покрытием или рельсами, аэродинамических процессов при движении транспортных средств, работы вспомогательных систем (компрессоры, вентиляторы). Уровни звукового давления на территориях, прилегающих к дорогам с интенсивным движением общественного транспорта, систематически превышают гигиенические нормативы, установленные СанПиН 1.2.3685-21 для селитебных территорий (55 дБА в дневное время, 45 дБА в ночное время) [5].

Временная изменчивость акустического загрязнения в зоне влияния маршрутной сети общественного транспорта определяется режимом движения транспортных средств в течение суток. Эквивалентные уровни звука в часы пик превышают среднесуточные значения на 15-30 дБА.

Воздействие транспортного шума на здоровье населения проявляется в нарушениях сна, повышении артериального давления, развитии сердечно-

сосудистых заболеваний, снижении когнитивных функций, повышении уровня стресса и тревожности. Снижение акустического загрязнения в городах рассматривается как важное направление улучшения качества городской среды и здоровья населения [20].

Выводы по первой главе

Таким образом, общественный транспорт представляет собой значимый фактор воздействия на окружающую среду урбанизированных территорий, формирующий устойчивые зоны повышенной антропогенной нагрузки вдоль транспортных магистралей. Комплексный характер воздействия включает загрязнение атмосферного воздуха, акустическое загрязнение, загрязнение почв и поверхностных вод, что требует применения интегрированных подходов к оценке экологического состояния территорий в зонах влияния транспортной инфраструктуры. Развитие нормативно-правовой базы и методического инструментария оценки воздействия транспорта на окружающую среду создает предпосылки для планирования природоохранных мероприятий и оптимизации ситуации в городах.

Классификация общественного транспорта по комплексу технических и эксплуатационных признаков позволяет систематизировать знания о структуре транспортных систем городов и дифференцированно оценивать воздействие различных видов транспортных средств на окружающую среду. Развитие технологий в области двигателестроения, электрификации транспорта и использования альтернативных видов топлива создает предпосылки для существенного снижения экологической нагрузки от общественного транспорта при условии реализации комплексных программ обновления парка подвижного состава и совершенствования транспортной инфраструктуры городов.

Система экологических требований к общественному транспорту в Российской Федерации представляет собой комплекс нормативно-правовых и нормативно-технических документов, регламентирующих выбросы загрязняющих веществ, шумовые характеристики, качество моторного топлива, процедуры подтверждения соответствия и экологического контроля. Последовательное ужесточение экологических стандартов стимулирует технологическое развитие транспортного машиностроения и создает предпосылки для снижения негативного воздействия транспорта на окружающую среду и здоровье населения городов.

Сравнительный анализ экологических характеристик различных видов общественного транспорта показывает существенные преимущества электрического транспорта по большинству показателей воздействия на окружающую среду. Выбор оптимального вида транспорта для конкретных условий должен основываться на комплексной оценке экологических, экономических и градостроительных факторов с учетом величины и структуры пассажиропотоков, особенностей городской застройки, доступных финансовых ресурсов, перспектив развития транспортной системы города.

Выбросы парниковых газов и акустическое загрязнение представляют собой значимые виды воздействия общественного транспорта на окружающую среду городов, требующие комплексной оценки и разработки целенаправленных мероприятий по снижению негативного воздействия. Пространственно-временная изменчивость этих видов воздействия определяется структурой маршрутной сети, интенсивностью движения транспортных средств, техническими характеристиками подвижного состава и требует применения современных инструментальных и расчетных методов оценки для обоснования природоохранных решений в области развития транспортных систем городов.

ГЛАВА 2. ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЧЕЛЯБИНСКА И АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

2.1. Физико-географические детерминанты состояния биосферы Челябинского промышленного узла

Челябинск расположен в южной части Среднего Урала, на восточном склоне Уральских гор, в зоне перехода от горных ландшафтов к равнинам Зауралья, что определяет специфические природно-климатические условия формирования и рассеивания атмосферных загрязнений. Географические координаты центра города: 55°09’ северной широты, 61°24’ восточной долготы. Территория города занимает площадь около 530 квадратных километров и располагается на высотах от 200 до 250 метров над уровнем моря. Рельеф территории характеризуется холмистым характером с общим понижением в восточном направлении, наличием речных долин и балок, что создает условия для формирования локальных застойных зон с ограниченным воздухообменом и аккумуляцией загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы [32].

Геологическое строение территории Челябинского промышленного узла определяется его положением в пределах восточного склона Южного Урала, где на поверхность выходят метаморфические и магматические породы палеозойского возраста, перекрытые чехлом мезо-кайнозойских осадочных отложений. Кристаллический фундамент сложен гранитами, гранодиоритами, метаморфическими сланцами, что определяет относительную устойчивость территории к тектоническим процессам. Осадочный чехол представлен глинами, суглинками, песками, супесями четвертичного возраста мощностью от 5 до 30 метров. Особенности геологического строения влияют на гидрогеологические условия территории,

характер поверхностного стока, устойчивость грунтов к техногенным нагрузкам [35].

Климат Челябинска характеризуется как умеренно континентальный с холодной продолжительной зимой и теплым летом. Среднегодовая температура воздуха составляет +3.6°С, средняя температура января -14.2°С, июля +19.1°С. Абсолютный минимум температуры воздуха достигает -42°С, абсолютный максимум +40°С, что свидетельствует о значительной амплитуде температурных колебаний, характерной для континентального климата. Продолжительность периода с температурой выше 0°С составляет 190-200 дней, периода с температурой выше +10°С – 125-135 дней. Сумма активных температур выше +10°С достигает 2100-2300 градусо-дней, что обеспечивает благоприятные условия для развития растительности умеренной зоны [1].

Режим атмосферных осадков характеризуется неравномерным распределением в течение года с максимумом в летний период. Среднегодовая сумма осадков составляет 400-450 мм, из которых около 70% выпадает в теплый период года (апрель-октябрь). Максимум осадков приходится на июль-август (60-80 мм в месяц), минимум – на февраль-март (15-20 мм в месяц). Снежный покров устанавливается в конце октября - начале ноября и сохраняется до середины апреля. Средняя высота снежного покрова достигает 30-40 см. Продолжительность залегания снежного покрова составляет 150-160 дней. Неравномерность увлажнения территории в течение года определяет выраженную сезонность гидрологических процессов и миграции загрязняющих веществ в ландшафтах [6].

Ветровой режим территории Челябинска характеризуется преобладанием ветров западного и юго-западного направлений, обусловленным общей циркуляцией атмосферы умеренных широт и орографическими особенностями Уральских гор. Повторяемость ветров западного и юго-западного направлений составляет 35-40%, южных и юго-

восточных – 20-25%, северных и северо-восточных – 15-20%. Средняя годовая скорость ветра составляет 3,5-4 м/с, что соответствует умеренным значениям, благоприятным для рассеивания атмосферных загрязнений. Однако в холодный период года часто наблюдаются приземные температурные инверсии, препятствующие вертикальному перемешиванию воздушных масс и способствующие накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы. Повторяемость штилей составляет 8-12%, что также способствует формированию повышенных концентраций загрязняющих веществ в периоды отсутствия ветра [30].

Гидрографическая сеть территории Челябинска представлена рекой Миасс, которая протекает через центральную часть города с севера на юг, деля его на две части. Длина реки в пределах города составляет около 30 километров, ширина русла 20-50 метров, глубина 0.5-2 метра. Режим стока характеризуется выраженным весенним половодьем (апрель-май), на долю которого приходится 60-70% годового стока, летне-осенней меженью с отдельными дождевыми паводками, зимней меженью с минимальными расходами воды. Среднегодовой расход воды реки Миасс в створе города составляет 8-12 м³/с. Река и ее притоки испытывают значительную антропогенную нагрузку, являясь приемниками сточных вод промышленных предприятий и коммунального хозяйства города.

Озерно-водохранилищные системы на территории Челябинска представлены Шершневским водохранилищем, расположенным в верхнем течении реки Миасс и являющимся основным источником водоснабжения города, а также рядом небольших озер и прудов. Шершневское водохранилище имеет площадь зеркала около 35 квадратных километров, объем 180 миллионов кубометров, среднюю глубину 5-6 метров. Водохранилище выполняет важные функции в системе водоснабжения города, рекреации, регулирования стока. Экологическое состояние водохранилища

характеризуется как умеренно загрязненное, что связано с поступлением загрязняющих веществ с водосборной площади и недостаточной эффективностью очистки сточных вод [18].

Почвенный покров территории Челябинска представлен черноземами выщелоченными и оподзоленными на водоразделах и пологих склонах, серыми лесными почвами на склонах северной экспозиции, аллювиальными дерновыми почвами в поймах рек. Мощность гумусового горизонта черноземов составляет 40-60 см, содержание гумуса 6-8%, что соответствует высокому естественному плодородию. Однако в результате длительной урбанизации и промышленного освоения территории естественный почвенный покров сохранился лишь фрагментарно в парках и лесопарковых зонах. На большей части территории города развиты антропогенно-преобразованные почвы: урбаноземы, техноземы, реплантоземы, характеризующиеся нарушенным строением профиля, высокой степенью уплотнения, загрязнением тяжелыми металлами, нефтепродуктами, другими токсичными веществами техногенного происхождения [16].

Растительность естественного происхождения сохранилась на территории Челябинска фрагментарно в лесопарковых зонах и представлена березовыми и сосново-березовыми лесами с примесью осины, липы. В подлеске встречаются черемуха, рябина, шиповник, калина. Травяной покров представлен лесными и луговыми видами: ежой сборной, овсяницей луговой, кострецом безостым, тимофеевкой луговой. Общая лесистость территории города составляет около 15%, что существенно ниже экологически обоснованных нормативов для крупных промышленных центров (40-50%). Зеленые насаждения на территории города представлены преимущественно искусственными посадками в парках, скверах, вдоль улиц и включают интродуцированные виды: тополь бальзамический, клен ясенелистный, яблоню ягодную, карагану древовидную. Состояние зеленых насаждений в

зонах интенсивного движения транспорта характеризуется как ослабленное, что проявляется в суховершинности, преждевременном опадении листвы, снижении прироста [25].

Ландшафтная структура территории Челябинска характеризуется высокой степенью антропогенной трансформации. Выделяются следующие основные типы ландшафтов:

1. Промышленные ландшафты, занимающие около 20% территории и представленные комплексами металлургических, машиностроительных, химических предприятий с нарушенным почвенно-растительным покровом, высоким уровнем загрязнения всех компонентов природной среды.

2. Селитебные ландшафты жилой застройки, занимающие около 45% территории и характеризующиеся значительной запечатанностью поверхности, развитием урбаноземов, фрагментарным озеленением.

3. Транспортные ландшафты, занимающие около 10% территории и представленные автомагистралями, железнодорожными путями с придорожными техноземами, высоким уровнем загрязнения тяжелыми металлами и нефтепродуктами.

4. Рекреационные ландшафты парков и лесопарков, занимающие около 15% территории и сохраняющие фрагменты естественной и полуестественной растительности.

5. Нарушенные ландшафты промышленных отвалов, карьеров, свалок, занимающие около 3% территории.

6. Лесные и луговые ландшафты пригородной зоны, занимающие около 7% территории [8].

Метеорологические условия рассеивания атмосферных загрязнений на территории Челябинска оцениваются как неблагоприятные для крупного промышленного центра. Потенциал загрязнения атмосферы (ПЗА), характеризующий метеорологические условия, способствующие накоплению

загрязняющих веществ в приземном слое, оценивается как повышенный (3.5-4.0 балла по пятибалльной шкале). Это обусловлено относительно низкой средней скоростью ветра, высокой повторяемостью приземных температурных инверсий в холодный период года (35-40%), наличием форм рельефа, затрудняющих воздухообмен. Наиболее неблагоприятные условия рассеивания наблюдаются в зимние месяцы при устойчивых антициклонах, сопровождающихся штилями и инверсиями температуры, когда концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе могут превышать предельно допустимые значения в 3-5 раз [6].

Геоэкологическая обстановка на территории Челябинского промышленного узла характеризуется как напряженная, что обусловлено длительной историей промышленного развития, высокой концентрацией источников техногенного воздействия, аккумуляцией загрязняющих веществ в компонентах природной среды за десятилетия индустриального освоения. По данным Государственного доклада о состоянии окружающей среды в Челябинской области, город входит в число территорий с наибольшим уровнем загрязнения атмосферного воздуха в регионе. Индекс загрязнения атмосферы (ИЗА), рассчитываемый по совокупности приоритетных загрязняющих веществ, составляет 9-11, что соответствует высокому уровню загрязнения. Основными загрязнителями являются взвешенные вещества, диоксид азота, бенз(а)пирен, формальдегид.

Специфика геоэкологических условий территории Челябинска определяет особенности формирования и трансформации загрязнений от транспортных источников. Холмистый рельеф способствует образованию застойных зон в понижениях и долинах рек, где концентрации загрязняющих веществ могут превышать средние значения в 1,5-2 раза. Неблагоприятные метеорологические условия рассеивания, особенно в холодный период года, усиливают негативное воздействие транспортных выбросов на качество

атмосферного воздуха. Деградация почвенно-растительного покрова снижает способность городских ландшафтов к самоочищению и ассимиляции загрязняющих веществ. Эти особенности необходимо учитывать при оценке воздействия общественного транспорта на окружающую среду города и разработке природоохранных мероприятий [25].

2.2. Современное состояние и динамика парка общественного транспорта города

Система общественного транспорта Челябинска включает автобусное, троллейбусное и трамвайное сообщение, обеспечивающее перевозку более 200 миллионов пассажиров в год. Структура парка подвижного состава, его техническое состояние и динамика обновления определяют экологическую нагрузку на окружающую среду города и являются ключевыми факторами формирования качества атмосферного воздуха и акустической среды на урбанизированной территории. По состоянию на 2026 г. общая численность единиц подвижного состава общественного транспорта составляет 2064 единиц, из которых автобусы составляют 65%, троллейбусы – 15%, трамваи – 20%. Структура парка по видам транспорта за последние 15 лет претерпела существенные изменения, связанные с сокращением электрического транспорта и увеличением доли автобусов [23]. Основные виды транспорта представлены на рисунках 1-8 в первой главе работы.

Автобусный парк города представлен транспортными средствами различных производителей, типов и экологических классов. Основу парка составляют автобусы перечисленные в пункте 1.2, преимущественно работающие на компримированном природном газе, реже – на дизельном топливе и сжиженном природном газе. Структура автобусного парка по экологическим классам характеризуется преобладанием транспортных

средств класса Евро-4 и Евро-5, доля которых составляет около 70%, транспортные средства класса Евро-3 и ниже составляют около 25%, современные автобусы класса Евро-6 – около 5%.

Динамика обновления автобусного парка в период 2015-2026 гг. характеризуется поступлением в среднем 40-60 новых автобусов ежегодно при списании 30-50 единиц выработавшего ресурс подвижного состава. Темпы обновления недостаточны для полной замены устаревшего парка в нормативные сроки, что обусловлено ограниченностью финансовых ресурсов муниципального бюджета и автотранспортных предприятий. В последние годы наблюдается тенденция увеличения доли автобусов, работающих на компримированном природном газе, в структуре закупаемого подвижного состава, что связано с реализацией программы газификации общественного транспорта и экологическими преимуществами природного газа как моторного топлива. Доля газовых автобусов в общей структуре парка возросла с 10% в 2015 г. до 35% в 2026 г. [9].

Троллейбусный парк Челябинска представлен транспортными средствами марок Синара 6254.00, Синара 6254.01, вместимостью 60-90 пассажиров. В рамках концессии количество новых троллейбусов увеличивается, что создает устойчивое развитие экологической транспортной сети в городе [11].

Трамвайный парк города включает вагоны моделей 71-605, а также современные низкопольные трамваи модели 71-623 и 71-628 Усть-Катавского вагоностроительного завода. Общая численность трамвайных вагонов составляет 272 единицы. Протяженность трамвайных путей в Челябинске составляет около 60 километров, техническое состояние путевого хозяйства оценивается как неудовлетворительное на 25% протяженности линий, что ограничивает скорость движения, увеличивает энергопотребление и уровни шума [10].

Маршрутная сеть общественного транспорта Челябинска включает 79 автобусных маршрутов, 17 троллейбусных маршрутов, 8 трамвайных маршрутов общей протяженностью более 1500 километров. Плотность маршрутной сети составляет 2.8 км на квадратный километр территории города, что соответствует нормативным значениям для крупных городов (2.5-3.0 км/км²). Средняя дальность поездки пассажира составляет 8-10 километров, среднее время в пути 35-40 минут. Коэффициент использования вместимости подвижного состава в часы пик достигает 0.8-0.9, в межпиковые периоды снижается до 0.3-0.4, что указывает на неравномерность пассажиропотоков в течение суток и необходимость оптимизации графиков движения для повышения эффективности использования транспортных средств [33].

Интенсивность движения общественного транспорта на основных магистралях города в часы пик достигает 40-60 единиц в час на одну полосу движения, что соответствует высоким значениям транспортной нагрузки. Наиболее напряженными участками маршрутной сети являются центральные магистрали: проспект Ленина, улица Братьев Кашириных, проспект Победы, где проходит одновременно 10-15 маршрутов различных видов транспорта. На этих участках формируются максимальные концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и наиболее высокие уровни акустического загрязнения. Периферийные районы города характеризуются меньшей плотностью маршрутной сети и интенсивностью движения общественного транспорта, что определяет более благоприятную экологическую обстановку [31].

Техническое состояние подвижного состава общественного транспорта контролируется в рамках обязательных периодических технических осмотров, включающих проверку экологических параметров: содержание загрязняющих веществ в отработавших газах, дымность отработавших газов дизельных

двигателей, уровни шума. По данным технических осмотров, около 15% автобусов не соответствуют нормативным требованиям по содержанию оксида углерода и углеводородов в отработавших газах, что свидетельствует о неудовлетворительной регулировке систем питания двигателей и необходимости проведения ремонтных работ. Дымность отработавших газов дизельных автобусов превышает предельно допустимые значения у 10% транспортных средств, что связано с износом цилиндро-поршневой группы двигателей и топливной аппаратуры.

Система технического обслуживания и ремонта подвижного состава общественного транспорта включает автотранспортные предприятия с комплексом производственных участков для проведения ежедневного технического обслуживания, текущего и капитального ремонта. Техническая оснащенность предприятий характеризуется как недостаточная, износ технологического оборудования составляет 60-70%, что ограничивает возможности качественного обслуживания подвижного состава и поддержания его экологических характеристик на нормативном уровне. Внедрение современных систем диагностики, включая газоанализаторы для контроля токсичности отработавших газов, шумомеры для контроля акустических параметров, осуществляется недостаточными темпами [33].

Организация перевозок пассажиров общественным транспортом в Челябинске осуществляется на основе муниципального контракта с перевозчиками, устанавливающего объемы перевозок, маршруты движения, интервалы и графики движения, тарифы на проезд, требования к качеству обслуживания пассажиров. Система включает как муниципальные унитарные предприятия, так и коммерческие перевозчики, работающие на условиях концессионных соглашений. Контроль выполнения условий контрактов, включая экологические требования к подвижному составу, осуществляется

Управлением дорог и транспорта Администрации города Челябинска совместно с Управлением Росприроднадзора по Челябинской области.

Программы модернизации общественного транспорта Челябинска, реализуемые в рамках национальных проектов и региональных программ, предусматривают обновление парка подвижного состава, внедрение экологически чистых видов транспорта, модернизацию инфраструктуры. В 2019-2026 гг. приобретено 916 единиц транспорта экологического класса Евро-5 и Евро-6, в том числе 80 газовых автобусов. Реализуется программа ремонта трамвайных путей и контактной сети, модернизации тяговых подстанций. Однако темпы реализации программ недостаточны для решения накопившихся проблем в нормативные сроки.

Перспективы развития системы общественного транспорта Челябинска связаны с дальнейшей модернизацией парка подвижного состава, внедрением альтернативных видов топлива и электрического транспорта, оптимизацией маршрутной сети, развитием инфраструктуры для экологически чистого транспорта. Стратегия развития транспортной системы города на период до 2030 г. предусматривает увеличение доли электрического и газового транспорта до 60% в структуре парка, полную замену транспортных средств экологических классов ниже Евро-4, внедрение интеллектуальных транспортных систем для оптимизации управления транспортными потоками. Реализация этих мероприятий позволит существенно снизить экологическую нагрузку от общественного транспорта на окружающую среду города [34].

2.3. Методика исследования загрязнения атмосферного воздуха от общественного транспорта города Челябинска

Методика исследования загрязнения атмосферного воздуха от общественного транспорта включает комплекс расчетных и

инструментальных методов, обеспечивающих определение валовых выбросов загрязняющих веществ, пространственно-временного распределения концентраций в приземном слое атмосферы, оценку вклада транспортных источников в суммарное загрязнение, сопоставление фактических концентраций с гигиеническими нормативами. Методическая база исследования формируется на основе «Методики проведения инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для автотранспортных предприятий», ГОСТ Р 56162-2014 «Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Метод расчета выбросов от автомобильного транспорта», методик выполнения измерений концентраций загрязняющих веществ, аттестованных в соответствии с требованиями законодательства об обеспечении единства измерений [21].

Комплексное применение расчетных и инструментальных методов позволяет получить объективную картину экологического состояния атмосферного воздуха в зонах влияния транспортной инфраструктуры и обосновать природоохранные мероприятия по снижению негативного воздействия. Методическая база исследования формируется на основе нормативно-технических документов, регламентирующих процедуры расчета выбросов и проведения инструментальных измерений концентраций загрязняющих веществ [14].

Автоматические газоанализаторы, применяемые для непрерывного мониторинга качества атмосферного воздуха, обеспечивают измерения концентраций загрязняющих веществ с высоким временным разрешением (от 1 минуты до 1 часа) и позволяют выявить закономерности изменчивости концентраций в течение суток, связь с интенсивностью движения транспорта, метеорологическими условиями. Для определения концентрации оксида углерода применяются газоанализаторы с инфракрасным абсорбционным методом измерения, для диоксида азота и оксида азота - газоанализаторы с

хемилюминесцентным методом, для диоксида серы - газоанализаторы с флуоресцентным методом. Современные многокомпонентные газоанализаторы обеспечивают одновременное измерение концентраций нескольких веществ и оснащены системами регистрации и передачи данных [26].

Отбор проб атмосферного воздуха для определения концентрации оксида углерода проводится с использованием электрохимического газоанализатора анализаторы взвешенных частиц АП МПА, обеспечивающего прямые измерения концентраций в диапазоне 0-200 мг/м³ с дискретностью 1 мг/м³. Измерения проводятся в режиме непрерывного мониторинга в течение 30 минут с регистрацией мгновенных значений концентрации каждые 10 секунд. По результатам серии измерений рассчитывается среднее арифметическое значение концентрации, максимальное значение, стандартное отклонение. Для выявления временной изменчивости концентраций измерения проводятся в различные периоды суток: в часы пик утром (7:00-9:00) и вечером (17:00-19:00), в межпиковые периоды, в ночное время.

Обработка результатов измерений включает следующие этапы:

1. Расчет средних значений концентраций для каждой точки и периода суток на основе не менее трех параллельных определений.

2. Расчет стандартного отклонения и коэффициента вариации для оценки воспроизводимости результатов.

3. Построение графиков пространственного распределения концентраций в зависимости от расстояния до транспортной магистрали.

4. Сопоставление измеренных концентраций с предельно допустимыми концентрациями, установленными СанПиН 1.2.3685-21 для атмосферного воздуха населенных мест.

Доля выбросов от общественного транспорта в суммарных выбросах от автотранспорта города определяется с учетом численности парка общественного транспорта и среднего пробега транспортных средств. По оценкам, общественный транспорт формирует около 25-30% валовых выбросов от автотранспорта города при обеспечении более 50% пассажирских перевозок, что свидетельствует о более высокой экологической эффективности по сравнению с личным автомобильным транспортом [31].

Обработка результатов измерений концентраций загрязняющих веществ включает расчет статистических характеристик: среднее арифметическое значение, максимальное и минимальное значения, стандартное отклонение, коэффициент вариации. Для оценки соответствия фактических концентраций гигиеническим нормативам рассчитывается коэффициент кратности превышения ПДК по формуле:

$$K = C_{_факт} / ПДК$$

где $C_{_факт}$ – фактическая концентрация загрязняющего вещества, мг/м³; ПДК – предельно допустимая концентрация, мг/м³. Значения $K > 1$ свидетельствуют о превышении гигиенических нормативов. Для оценки комплексного загрязнения атмосферного воздуха рассчитывается индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) по формуле:

$$ИЗА = \Sigma(C_{_i} / ПДК_{_i})^{\wedge}p$$

где $C_{_i}$ – средняя концентрация i-го вещества, мг/м³; $ПДК_{_i}$ – предельно допустимая концентрация i-го вещества, мг/м³; p - показатель степени, принимаемый равным 1.7 для веществ 1-2 класса опасности и 1.3 для веществ 3-4 класса опасности [21].

Обеспечение качества измерений концентраций загрязняющих веществ включает метрологическую поверку средств измерений, использование

стандартных образцов состава газовых смесей для калибровки газоанализаторов, проведение контрольных измерений с заданной периодичностью, соблюдение требований методик выполнения измерений. Погрешность измерений концентраций загрязняющих веществ не должна превышать 25% для автоматических газоанализаторов и 30% для методов с отбором проб и лабораторным анализом. Систематические погрешности минимизируются путем регулярной калибровки приборов и контроля фоновых значений [36].

Интерпретация результатов измерений проводится с учетом метеорологических условий, интенсивности движения транспорта, характера застройки прилегающих территорий. Повышенные концентрации загрязняющих веществ в периоды с неблагоприятными метеорологическими условиями (штиль, приземная температурная инверсия) не всегда свидетельствуют об увеличении массы выбросов, а могут быть обусловлены ухудшением условий рассеивания. Корреляционный анализ зависимости концентраций от интенсивности движения транспорта позволяет количественно оценить вклад транспортных источников в суммарное загрязнение атмосферного воздуха и выделить участки территории с наибольшим воздействием от общественного транспорта [37].

2.4. Методика исследования шумового загрязнения окружающей среды от общественного транспорта города Челябинска

Методика исследования акустического загрязнения от общественного транспорта базируется на инструментальных измерениях уровней звука и звукового давления в октавных полосах частот в точках, расположенных на различных расстояниях от транспортных магистралей, с последующей статистической обработкой данных и оценкой соответствия измеренных

уровней гигиеническим нормативам. Методическая основа исследования формируется на базе ГОСТ 23337-2014 «Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий», СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», ГОСТ Р 53187-2008 «Акустика. Шумовой мониторинг городских территорий». Комплексное применение стандартизованных методов обеспечивает получение сопоставимых и воспроизводимых результатов измерений [12].

Инструментальной базой исследований является прецизионный интегрирующий шумомер-анализатор спектра 2 класса точности по ГОСТ Р 53188.1-2019, обеспечивающие измерение уровней звука с частотной коррекцией А, уровней звукового давления в октавных и третьоктавных полосах частот, эквивалентных и максимальных уровней звука за заданный период времени. Применяемый в исследовании прибор: шумомер-виброметр «RGK SM-20», обеспечивающие диапазон измерений 20-140 дБ с погрешностью не более ±0.7 дБ. Прибор оснащен микрофоном с всенаправленной характеристикой чувствительности, системами защиты от ветра, системами регистрации и хранения результатов измерений [35].



Рисунок 9 – Шумомер-виброметр «RGK SM-20», используемый для анализа шумового загрязнения Челябинска

Подготовка к проведению измерений включает метрологическую поверку шумомера в аккредитованной метрологической службе, калибровку приборов с использованием акустических калибраторов класса 1 (АК-1000, СА-22), контроль уровня заряда элементов питания, настройку параметров измерений в соответствии с задачами исследования. Калибровка прибора проводится перед началом и по окончании каждой серии измерений. Допустимое отклонение показаний прибора от калибратора не должно превышать ±0.5 дБ. Настройка параметров измерений включает выбор частотной коррекции (A), временной коррекции (S - медленно или F - быстро), интервала интегрирования для определения эквивалентного уровня звука (не менее 30 минут для дневного времени и 15 минут для ночного времени) [22].

Выбор точек измерений проводится с учетом следующих принципов:

1. Точки располагаются на территории, прилегающей к транспортным магистралям с движением общественного транспорта, на расстоянии 1 м от оси ближайшей полосы движения для выявления пространственного распределения уровней шума;

2. Точки размещаются на территориях различного функционального назначения для оценки воздействия разных классов транспортных средств и разной продолжительности эксплуатации;

3. Точки располагаются на открытой территории на расстоянии не менее 2 метров от зданий и других отражающих поверхностей для исключения влияния отраженного звука;

4. Высота размещения микрофона составляет 1,5 м от уровня земли, что соответствует зоне расположения органов слуха человека.

Для исследования выбраны характерные транспортные магистрали Челябинска с наибольшей интенсивностью движения общественного транспорта:

1. Северо-Запад, Курчатовский район: перекресток улицы Чичерина и проспекта Победы (трамвайное кольцо) (рисунок 10).

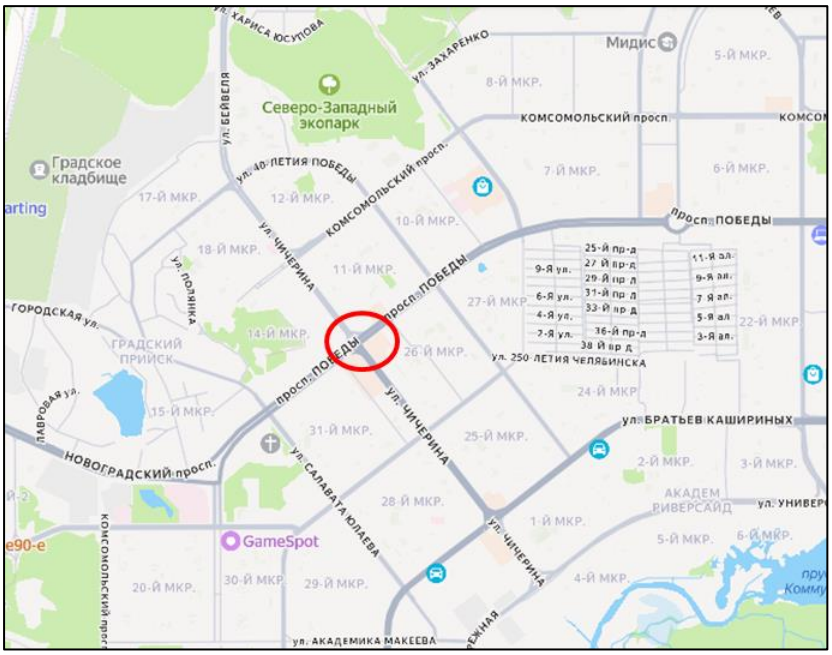


Рисунок 10 – Первый район исследования – место сбора данных.

Составлено автором

2. Центральный район: Проспект Ленина в районе площади Революции (рисунок 11).

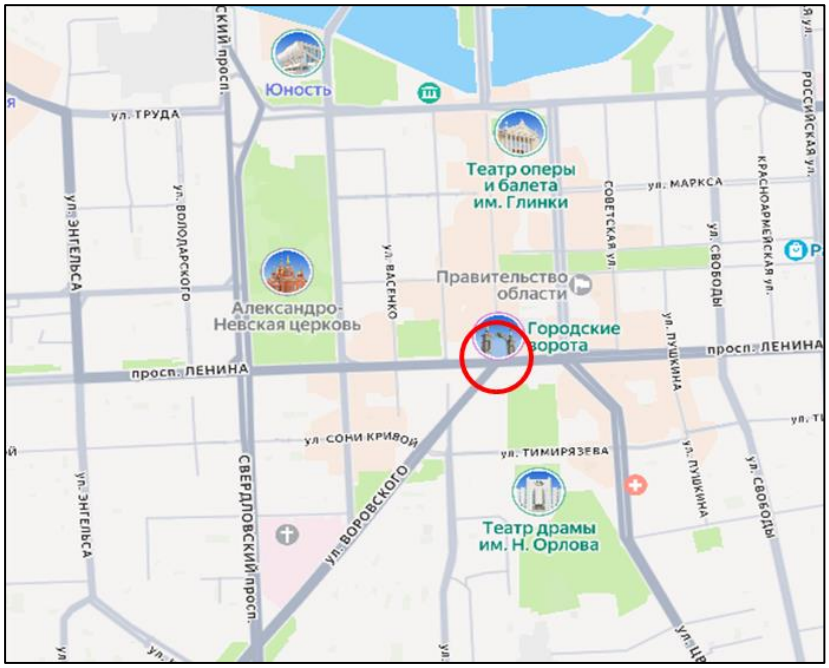


Рисунок 11 – Второй район исследования – место сбора данных.

Составлено автором

3. Ленинский район: перекресток улиц Дзержинского и Гагарина (район РК "Аврора") (рисунок 12).

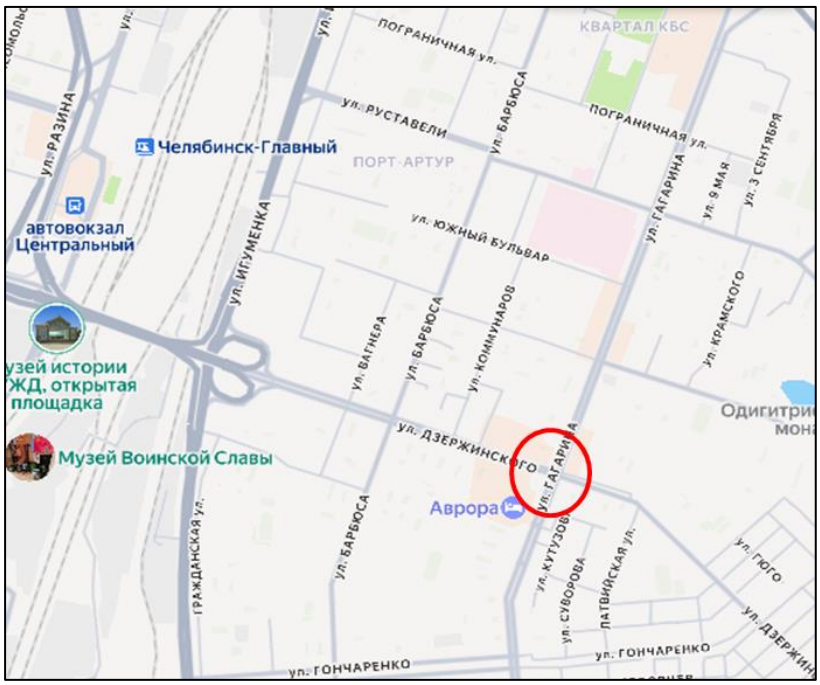


Рисунок 12 – Третий район исследования – место сбора данных.

Составлено автором

На каждой магистрали выбрано по 4 точки измерений на различных расстоянии 1 м от оси проезжей части, всего 12 основных точек измерений.

Измерения уровней шума проводятся в различные периоды суток для выявления временной изменчивости акустического воздействия:

1. В часы пик утром (7:00-9:00) и вечером (17:00-19:00), когда интенсивность движения общественного транспорта максимальна.

2. В межпиковый период дневного времени (12:00-14:00) при средней интенсивности движения.

В каждой точке в каждый период суток проводятся измерения продолжительностью не менее 30 минут в дневное время для определения эквивалентного уровня звука, характеризующего среднюю энергию шума за период измерений.

Методика проведения измерений в соответствии с ГОСТ 23337-2014 предусматривает следующую последовательность операций:

1. Установка штатива с шумомером в выбранной точке измерений, ориентация микрофона в направлении основного источника шума (транспортная магистраль).

2. Проведение предварительной калибровки прибора с использованием акустического калибратора.

3. Включение режима измерения эквивалентного уровня звука с частотной коррекцией А.

4. Проведение измерений в течение установленного времени с регистрацией результатов в памяти прибора.

5. Фиксация метеорологических условий измерений (температура воздуха, скорость ветра, осадки) и другой дополнительной информации в журнале измерений.

6. Проведение повторной калибровки прибора по окончании измерений для контроля стабильности характеристик.

Измерения проводятся при благоприятных метеорологических условиях: скорость ветра не более 5 м/с, отсутствие осадков. При скорости ветра более 3 м/с используется ветрозащитный экран для микрофона. Измерения не проводятся при наличии посторонних источников шума, существенно влияющих на результаты (строительные работы, массовые мероприятия и т.п.). Для каждой точки измерений проводится не менее трех независимых серий измерений для обеспечения статистической достоверности результатов.

Оценка соответствия фактических уровней шума гигиеническим нормативам проводится путем расчета превышения ПДУ по формуле:

$$\Delta L = L_{_экв} - L_{_ПДУ}$$

где ΔL – превышение предельно допустимого уровня, дБА; $L_{_экв}$ – измеренный эквивалентный уровень звука, дБА; $L_{_ПДУ}$ – предельно допустимый уровень для данной территории и времени суток, дБА. Положительные значения ΔL свидетельствуют о превышении гигиенических нормативов, отрицательные - о соответствии. Для территорий с превышением нормативов разрабатываются рекомендации по снижению уровней шума [12].

Анализ спектрального состава транспортного шума проводится на основе измерений уровней звукового давления в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц. Спектральный анализ позволяет выявить преобладающие частотные составляющие шума, связанные с различными источниками (двигатель, взаимодействие колес с дорожным покрытием, аэродинамический шум), и обосновать эффективные меры по шумозащите с учетом частотной зависимости звукоизоляции и звукопоглощения материалов. Для оценки соответствия спектра шума нормативам проводится сопоставление уровней

звукового давления в октавных полосах с предельно допустимыми значениями, установленными СанПиН 1.2.3685-21 [31].

Выводы по второй главе

Физико-географические условия территории Челябинска характеризуются сочетанием факторов, способствующих накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы и компонентах ландшафтов. Континентальность климата, неблагоприятные условия рассеивания атмосферных загрязнений, высокая степень антропогенной трансформации природных комплексов определяют повышенную уязвимость территории к техногенным воздействиям и требуют особого внимания к экологическим аспектам функционирования транспортной системы города.

Современное состояние парка общественного транспорта Челябинска характеризуется высокой степенью износа подвижного состава, недостаточными темпами обновления, преобладанием транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания, что обусловливает значительную экологическую нагрузку на городскую среду. Ускорение темпов модернизации транспортной системы является необходимым условием улучшения экологической ситуации и повышения качества жизни населения города.

Методика исследования загрязнения атмосферного воздуха от общественного транспорта города Челябинска обеспечивает комплексную оценку воздействия на качество атмосферного воздуха с использованием расчетных и инструментальных методов, позволяет количественно определить валовые выбросы, пространственно-временное распределение концентраций, соответствие гигиеническим нормативам и обосновать приоритетные направления природоохранных мероприятий.

Методика исследования акустического загрязнения от общественного транспорта обеспечивает получение объективных данных о пространственно-временном распределении уровней шума, их соответствии гигиеническим нормативам, связи с интенсивностью движения транспорта, что создает научную основу для разработки целенаправленных мероприятий по снижению акустического воздействия на население города.

ГЛАВА 3. МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА НА ЭКОСФЕРУ ГОРОДА ЧЕЛЯБИНСК

3.1. Пространственная дифференциация химического загрязнения в зонах влияния транспортных развязок

Мониторинг пространственной дифференциации химического загрязнения атмосферного воздуха в зонах влияния транспортных развязок общественного транспорта Челябинска проводился в весенний период 2026 года на 3 репрезентативных участках, расположенных вблизи крупных транспортных узлов города с высокой интенсивностью движения общественного транспорта. Для каждого участка были заложены профили мониторинга, перпендикулярные оси транспортной магистрали, с точками отбора проб воздуха на расстоянии 10 м от края проезжей части. Отбор проб атмосферного воздуха проводился аспирационным методом с использованием электроаспираторов производительностью 20 л/мин, продолжительность отбора проб составляла 20 минут для определения максимальных разовых концентраций (ПДКмр) и 24 часа для определения среднесуточных концентраций (ПДКсс) [29].

Определение концентраций основных загрязняющих веществ – диоксида азота (NO_2), оксида углерода (CO), взвешенных частиц PM10 – проводилось инструментальными методами с использованием стационарных газоанализаторов Полар-7 (для NO_2 и CO) с чувствительностью 0,1 мг/м³ для NO2 и 0,5 мг/м³ для CO, и оптических счетчиков частиц анализаторы взвешенных частиц АП МПА (для PM10) с чувствительностью 0,001 мг/м³. Измерения проводились в три временных периода: утренний пиковый период (7:00-9:00), дневной межпиковый период (12:00-14:00), вечерний пиковый

период (17:00-19:00), что позволило оценить суточную динамику концентраций загрязняющих веществ [37].

Результаты мониторинга показали выраженную пространственную дифференциацию концентраций загрязняющих веществ в зонах влияния транспортных развязок. Максимальная концентрация диоксида азота наблюдалась на расстоянии 10 м от края проезжей части, где значение максимальной среднесуточной концентрации NO_2 за весенний период 2026 г. в Северо-Западном районе составило 0,6 мг/м³ (при ПДКсс = 0,1 мг/м³), что свидетельствует об устойчивом превышении гигиенического норматива в непосредственной близости от транспортных магистралей (рисунок 13).

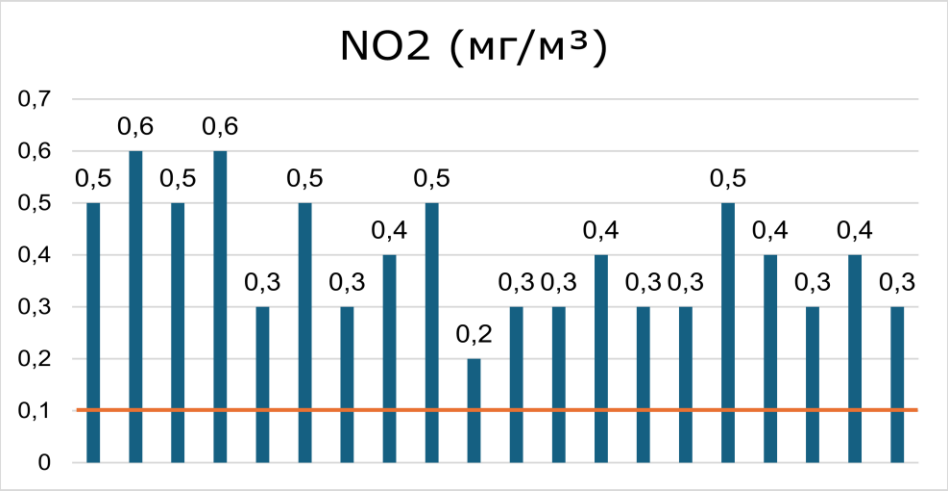


Рисунок 13 – Концентрации NO_2 в зонах влияния транспортной развязки Северо-Западном районе. Составлено автором.

В Центральном районе значение максимальной среднесуточной концентрации NO_2 за весенний период 2026 г. составило 0,1 мг/м³ (при ПДКсс = 0,1 мг/м³), что свидетельствует о сохранении концентрации в пределах нормы среднесуточных предельно допустимых значений в непосредственной близости от транспортных магистралей (рисунок 14).

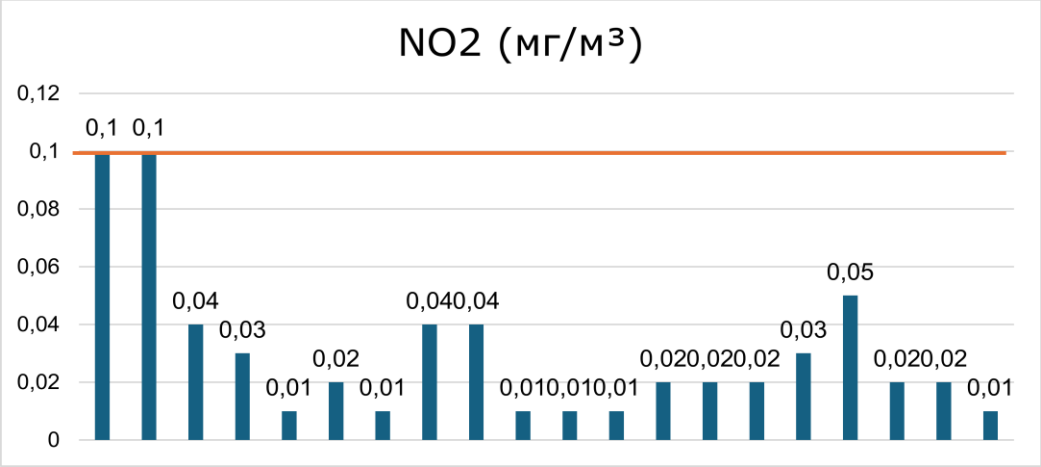


Рисунок 14 – Концентрации NO_2 в зонах влияния транспортной развязки в Центральном районе. Составлено автором.

В Ленинском районе значение максимальной среднесуточной концентрации NO_2 за весенний период 2026 г. составило 0,8 мг/м³ (при ПДКсс = 0,1 мг/м³), что свидетельствует об устойчивом превышении гигиенического норматива в непосредственной близости от транспортных магистралей (рисунок 15).

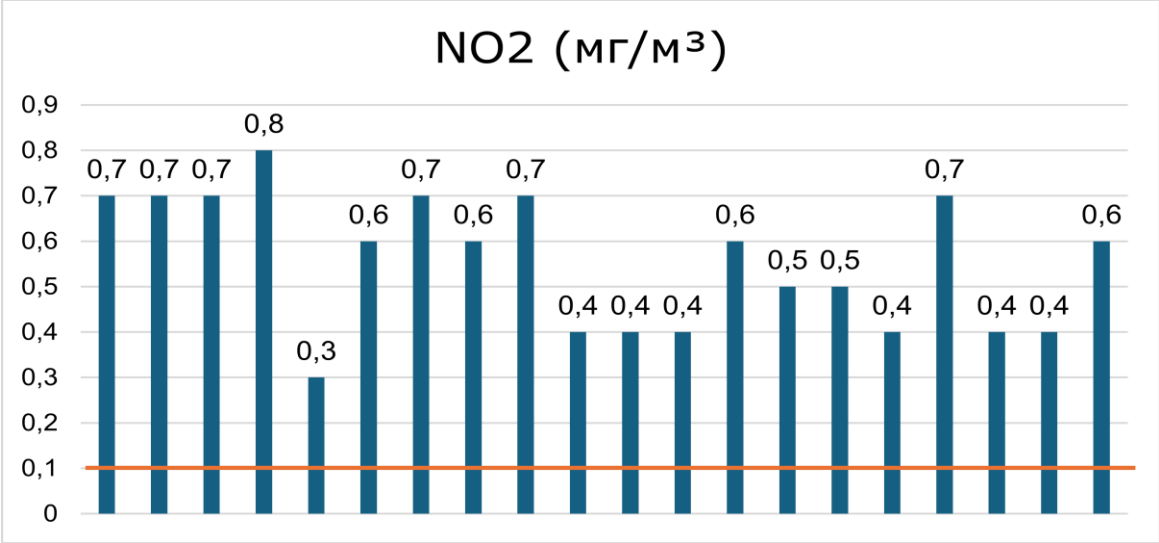


Рисунок 15 – Концентрации NO_2 в зонах влияния транспортной развязки в Ленинском районе. Составлено автором.

Концентрации оксида углерода в зонах влияния транспортных развязок были существенно ниже предельно допустимых, что объясняется улучшением экологических характеристик современных транспортных средств, оснащенных каталитическими нейтрализаторами, эффективно снижающими выбросы CO. Так, в Северо-Западном районе максимальная среднесуточная концентрация CO на расстоянии 10 м от дороги за весенний период 2026 г. составила 0,4 мг/м³, при норме 3,0 ПДКсс. Отсутствие превышений ПДК по оксиду углерода свидетельствует об эффективности технических мероприятий по снижению выбросов CO от автотранспорта (рисунок 16).

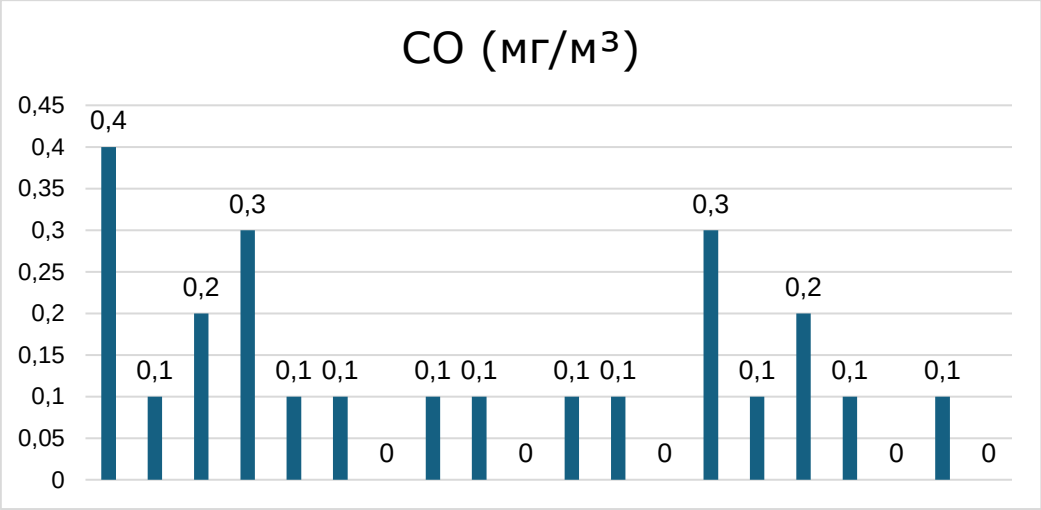


Рисунок 16 – Концентрации CO в зонах влияния транспортной развязки в Северо-Западном районе. Составлено автором.

В Центральном районе значение максимальной среднесуточной концентрации CO за весенний период 2026 г. составило 0,6 мг/м³ (при ПДКсс = 3,0 мг/м³), что свидетельствует о сохранении концентрации в пределах нормы среднесуточных предельно допустимых значений в непосредственной близости от транспортных магистралей (рисунок 17).

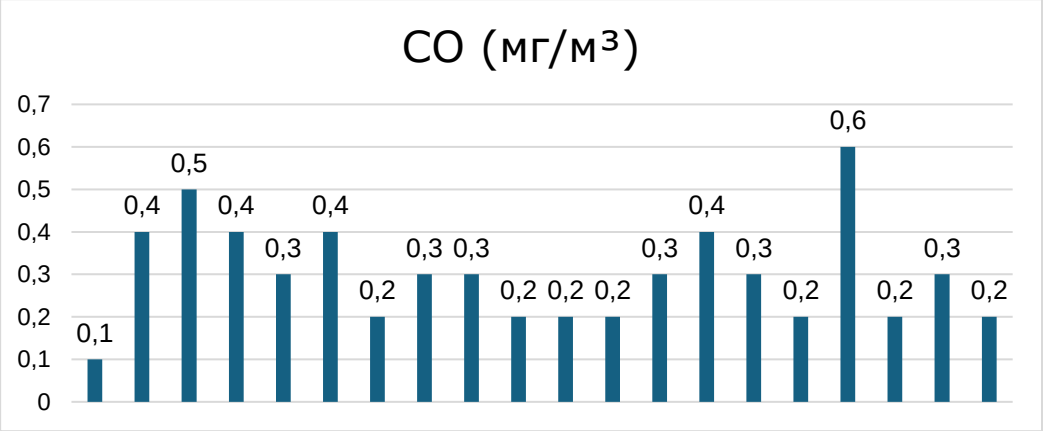


Рисунок 17 – Концентрации CO в зонах влияния транспортной развязки в Центральном районе. Составлено автором.

В Ленинском районе значение максимальной среднесуточной концентрации CO за весенний период 2026 г. составило 0,4 мг/м³ (при ПДКсс = 3,0 мг/м³), что свидетельствует о наличии загрязнений в пределах гигиенического норматива в непосредственной близости от транспортных магистралей (рисунок 18).

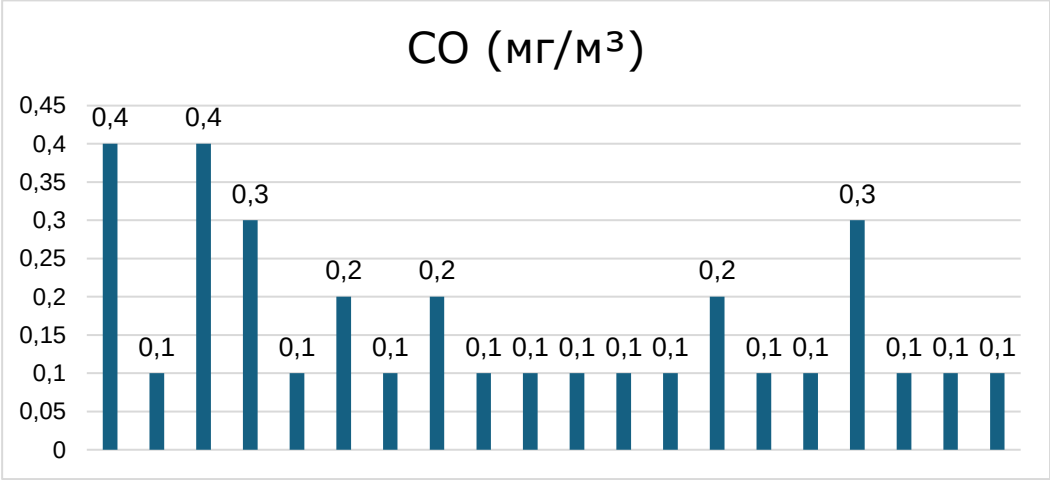


Рисунок 18 – Концентрации CO в зонах влияния транспортной развязки в Ленинском районе. Составлено автором.

Концентрации взвешенных частиц PM10 в зонах влияния транспортных развязок характеризовались устойчивым превышением среднесуточных гигиенических нормативов в непосредственной близости от транспортных

магистралей. Среднесуточная концентрация PM10 на расстоянии 10 м в Северо-Западном районе за весенний период 2026 г. составила 0,2 мг/м³ (0,06 ПДКсс) (рисунок 19). Повышенные концентрации взвешенных частиц в зонах влияния транспортных магистралей обусловлены вторичным пылеобразованием при истирании дорожного покрытия, тормозных колодок, шин.

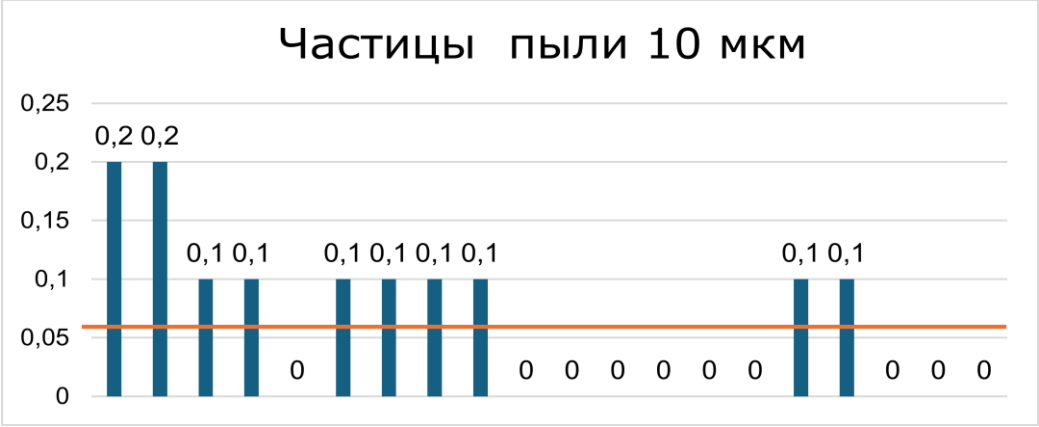


Рисунок 19 – Концентрации PM10 в зонах влияния транспортной развязки в Северо-Западном районе. Составлено автором.

В Центральном районе значение максимальной среднесуточной концентрации PM10 за весенний период 2026 г. составило 0,06 мг/м³ (при ПДКсс = 0,06 мг/м³), что свидетельствует о наличии загрязнений в пределах гигиенического норматива в непосредственной близости от транспортных магистралей (рисунок 20).

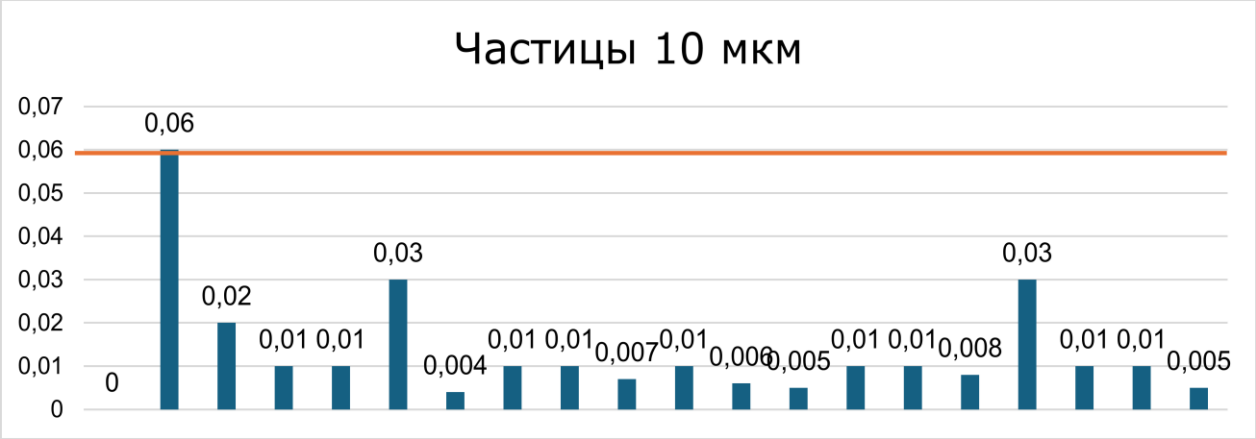


Рисунок 20 – Концентрации PM10 в зонах влияния транспортной развязки в Центральном районе. Составлено автором.

В Ленинском районе не проводилось измерение взвешенных частиц пыли PM10, так как данные мониторинга отсутствуют.

Сравнительный анализ концентраций загрязняющих веществ в различные временные периоды суток показал выраженные различия между пиковыми и межпиковыми периодами. В утренний пиковый период (7:00-9:00) концентрации NO_2 и CO были на 35-45% выше по сравнению с межпиковым периодом, что обусловлено максимальной интенсивностью движения транспорта. В вечерний пиковый период (17:00-19:00) концентрации NO_2 и CO были на 25-35% выше межпиковых значений. Концентрации взвешенных частиц также характеризовались повышением в пиковые периоды на 30-40% по сравнению с межпиковыми значениями.

Пространственная дифференциация загрязнения атмосферного воздуха в зонах влияния различных типов транспортных развязок показала, что максимальные уровни загрязнения характерны для регулируемых перекрестков со светофорным регулированием, где происходят многократные циклы остановки и разгона транспортных средств, что обусловливает повышенные удельные выбросы. По данным мониторинга Северо-Западный

район оказался самым загрязненным по среднесуточным концентрациям NO_2 и PM10 по сравнению с другими районами (Центральным и Ленинским).

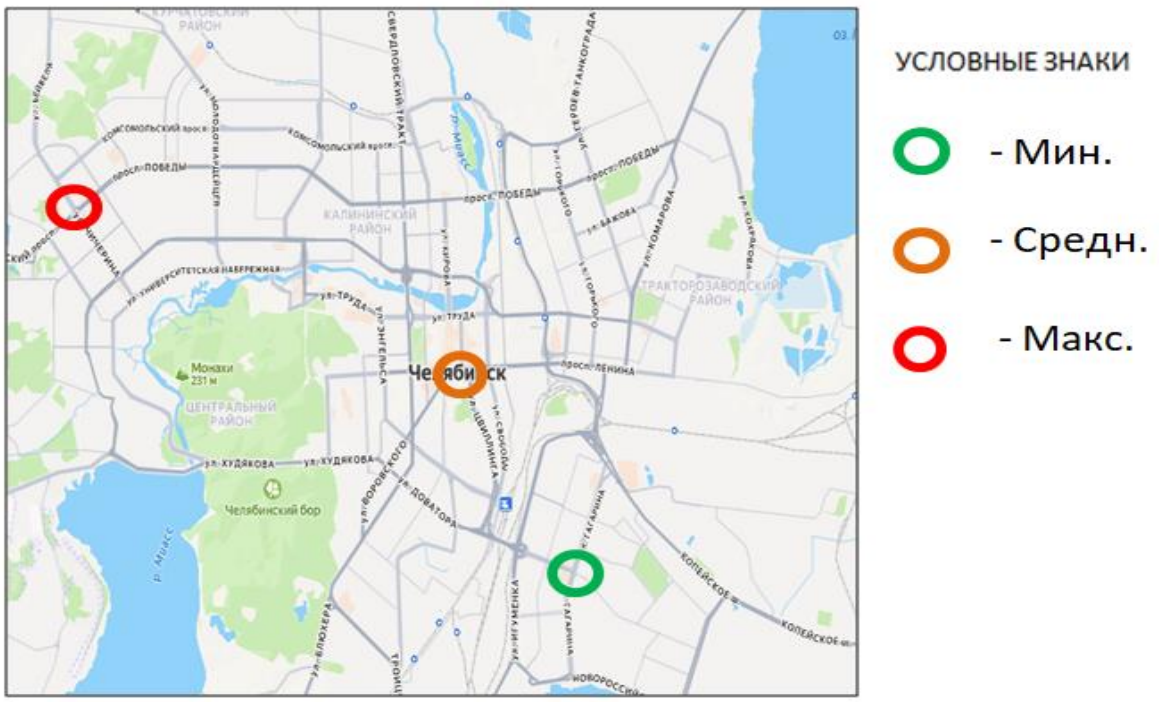


Рисунок 21 – Градация районов по степени загрязнения атмосферы в зонах влияния транспортной развязки в г.Челябинск. Составлено автором.

Анализ вклада общественного транспорта в суммарное загрязнение атмосферного воздуха в зонах транспортных развязок проведен на основе данных об интенсивности движения и удельных выбросах различных категорий транспортных средств. Расчеты показали, что при доле общественного транспорта в суммарном транспортном потоке около 8-12% (по количеству транспортных средств) его вклад в суммарные выбросы NO_2 составляет 25-32%, в суммарные выбросы PM10 – 20-28%, в суммарные выбросы CO – 15-20%. Относительно высокий вклад общественного транспорта в выбросы оксидов азота обусловлен преобладанием дизельных двигателей в парке автобусов и маршрутных такси, характеризующихся повышенными удельными выбросами NOx. Электротранспорт (трамваи, троллейбусы), составляющий около 25-30% общественного транспорта по

количеству единиц и 35-40% по пассажиропотоку, не имеет прямых выбросов в местах эксплуатации, что обусловливает его приоритетную роль в экологизации транспортной системы города.

Таким образом, результаты мониторинга пространственной дифференциации химического загрязнения в зонах влияния транспортных развязок общественного транспорта Челябинска показали выраженное повышение концентраций загрязняющих веществ (диоксида азота, взвешенных частиц PM10) в непосредственной близости от транспортных магистралей с устойчивым превышением гигиенических нормативов на расстоянии до 10 м от края проезжей части. Пространственная протяженность зон загрязнения, суточная и сезонная динамика концентраций определяются интенсивностью движения транспорта и метеорологическими условиями рассеивания примесей.

3.2. Оценка акустического загрязнения от общественного транспорта и его влияния на селитебные территории

Акустическое загрязнение (шумовое загрязнение) городской среды от функционирования общественного транспорта является одним из значимых факторов негативного воздействия на здоровье и качество жизни городского населения.

Мониторинг уровней шума от общественного транспорта на территориях жилой застройки Челябинска проводился в весенний период 2026 года на репрезентативных участках, расположенных вблизи магистральных транспортных коридоров с высокой интенсивностью движения общественного транспорта. Сбор данных проводился в трёх районах города: Северо-Западный, Центральный и Ленинский. Измерения уровней звука проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 23337-2014 «Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях

жилых и общественных зданий» с использованием шумомера 2 класса точности RGK SM-20. Точки измерений размещались на расстоянии 1 м от края проезжей части на высоте 1,5 м от поверхности земли. Измерения проводились в три временных периода: утренний период (с 7:00 до 9:00), дневной (12:00-14:00) и вечерние часы (с 17:00 до 19:00).

Определялись следующие акустические параметры: эквивалентный уровень звука LAeq (дБА), характеризующий среднюю энергию звука за период измерения; максимальный уровень звука LAmax (дБА), характеризующий максимальные пиковые значения шума; уровни звукового давления в октавных полосах частот (от 31,5 Гц до 8000 Гц). Продолжительность измерений составляла 30 минут в каждой точке для дневного и вечернего периодов. Параллельно проводилась регистрация интенсивности движения общественного транспорта (количество единиц, прошедших через контрольное сечение за период измерения) и состава транспортного потока (трамваи, троллейбусы, автобусы) [18].

Результаты измерений показали существенное превышение гигиенических нормативов по уровням шума на значительной части исследованных территорий жилой застройки, примыкающих к транспортным магистралям. Эквивалентный уровень звука в дневной период на расстоянии 1 м от края проезжей части магистральных улиц с интенсивным движением общественного транспорта составил в среднем 74,2±3,1 дБА (при ПДУ = 55 дБА для территорий, непосредственно прилегающих к жилым домам, превышение на 19,2 дБА.

Проведенный мониторинг в Северо-Западном районе города показал, что максимальное значение шума от Автобуса составило 83,7 дБ; от Трамвая – 70,3 дБ; от троллейбуса – 74,0 дБ (рисунок 21).

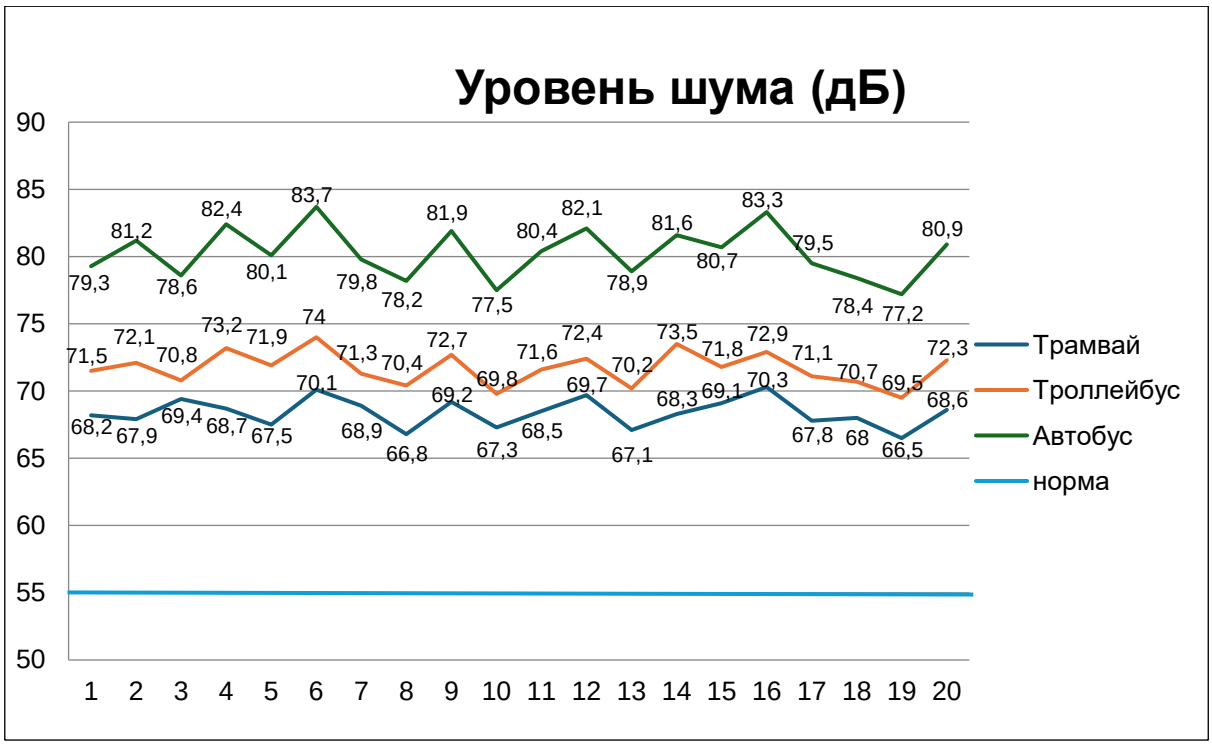


Рисунок 22 – Распределение уровней шума в зонах влияния транспортных магистралей Северо-Западного района. Составлено автором.

На территории Центрального района максимальный уровень звука от автобуса составил 87,1 дБ; от троллейбуса – 75,4дБ. Уровень шумового загрязнения от трамвая не измерялся, ввиду отсутствия трамвайных путей на точке, где проводились измерения. Большая интенсивность перевозки людей и количество проезжающего транспорта в пиковые часы, оказывает влияние на повышение уровня шума (рисунок 22).

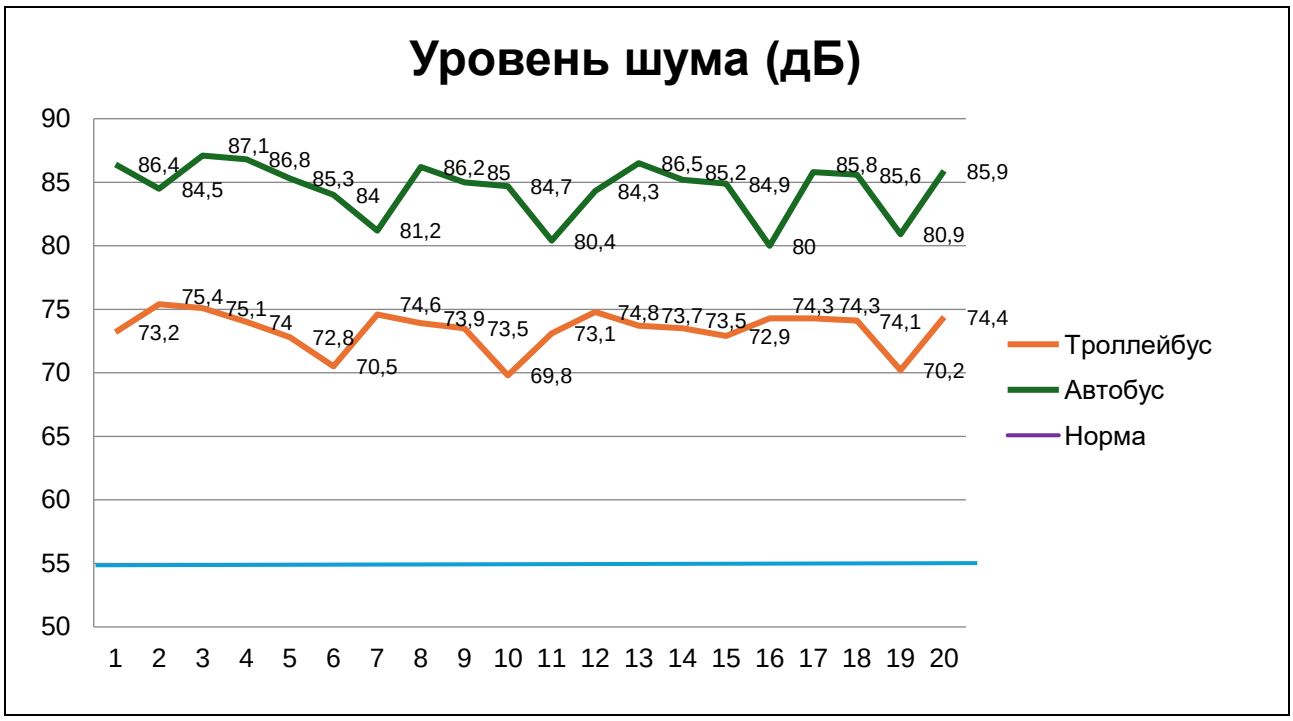


Рисунок 23 – Распределение уровней шума в зонах влияния транспортных магистралей Центрального района. Составлено автором.

В Ленинском районе максимальное значение шума от Автобуса составило 86,9 дБ; от трамвая – 81,3 дБ; от троллейбуса- 74,6 дБ. Данные показатели связаны с большим пассажиропотоком и интенсивностью движения транспортных средств на данном участке магистрали, а также с трамваями старого типа, которые являются более шумными по сравнению с трамваями нового стандарта.

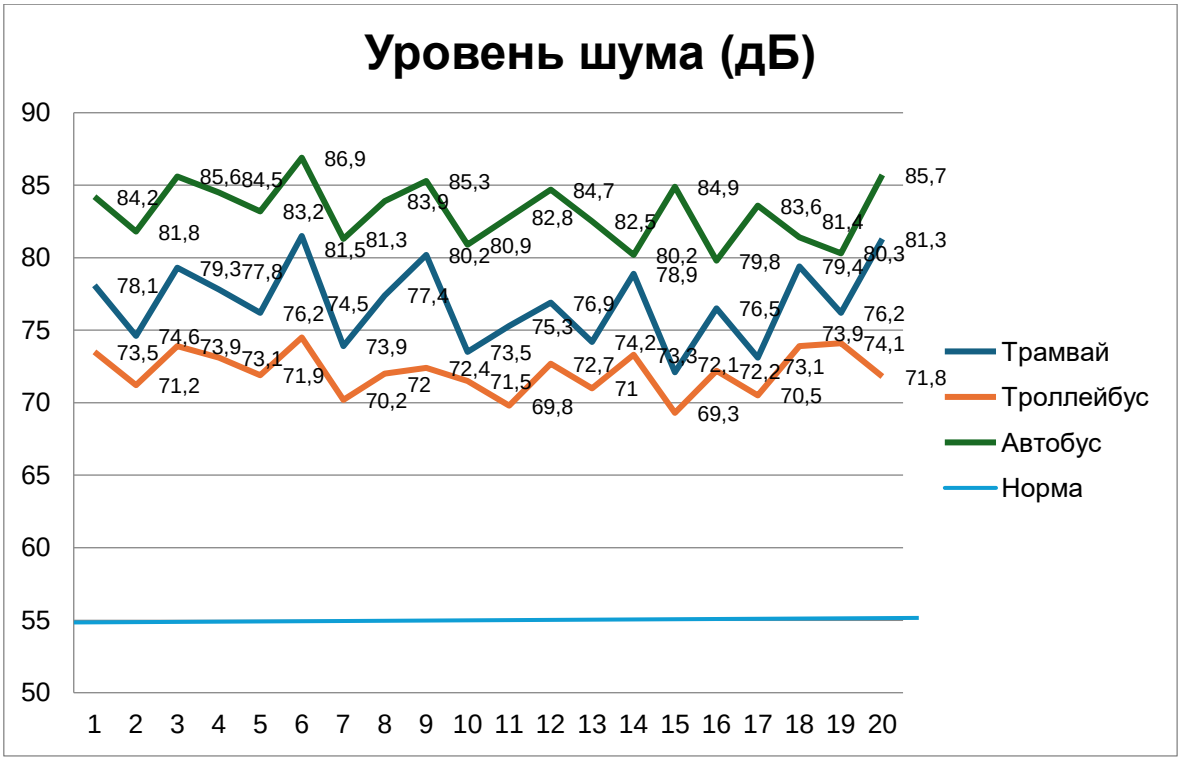


Рисунок 24 – Распределение уровней шума в зонах влияния транспортных магистралей Ленинского района. Составлено автором.

Анализ частотной структуры транспортного шума показал преобладание низкочастотных компонентов (с частотами 31,5-250 Гц) в спектре шума от автобусов и трамваев, что обусловлено работой двигателей и трансмиссий, качением колес по дорожному покрытию, вибрациями кузова. Низкочастотный шум обладает высокой проникающей способностью через ограждающие конструкции зданий и характеризуется повышенным раздражающим действием на человека. Трамваи генерируют специфический высокочастотный скрежещущий шум (с частотами 2000-8000 Гц) на участках с дефектами рельсового пути и при прохождении стрелочных переводов, уровни которого достигают 85-92 дБА.

Пространственная дифференциация шумового загрязнения в зонах влияния различных типов транспортных развязок показала, что максимальные уровни загрязнения характерны для регулируемых

перекрестков со светофорным регулированием и в местах остановок, где происходят многократные циклы остановки и разгона транспортных средств, что обусловливает повышенные уровни звукового фона. По данным мониторинга Центральный район оказался самым загрязненным по уровню шума по сравнению с другими районами (Северо-Западным и Ленинским).

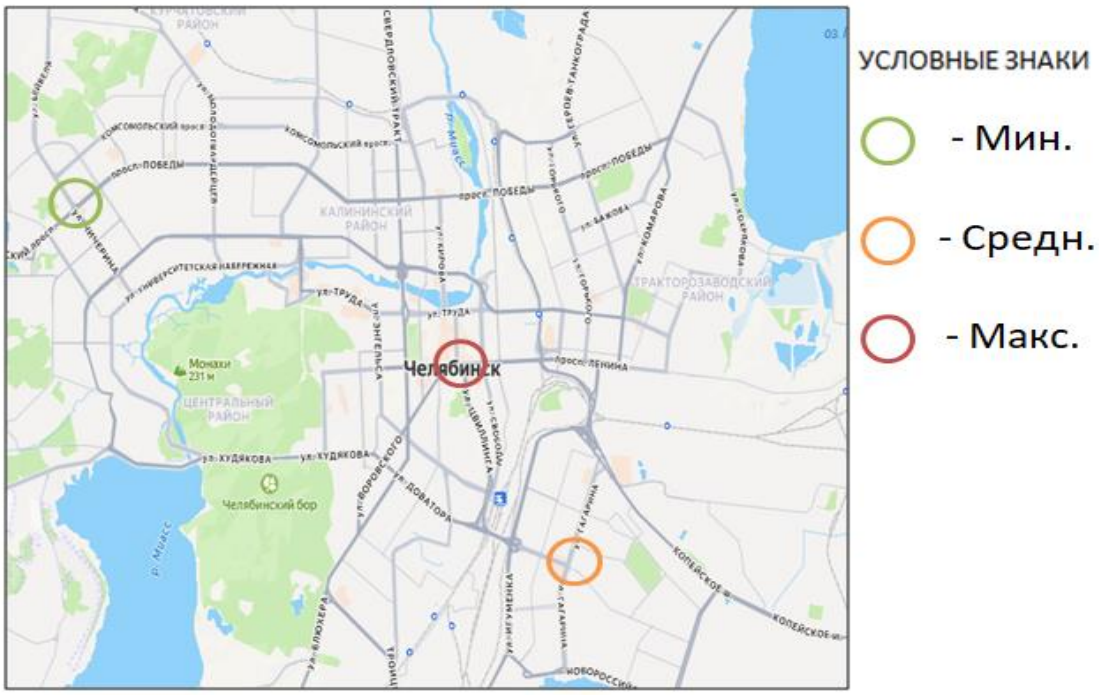


Рисунок 25 – Дифференциация районов по уровням шумового загрязнения в зонах влияния транспортных магистралей г.Челябинска. Составлено автором.

Сравнительный анализ уровней шума от различных видов общественного транспорта показал, что наиболее шумными являются автобусы на дизелном двигателе на участках с неудовлетворительным состоянием дорожного покрытия, где уровни шума при проезде автобуса достигают 78-86 дБА). Автобусы с газовыми двигателями – 72-77 дБА (на 3-5 дБА ниже дизельных). Трамваи старого типа являются самым шумным, но их мониторинг не проводился, ввиду замены сборного рельсового покрытия. Однако проводился мониторинг шумового загрязнения от трамваев нового

типа: уровень шума составил в среднем 75-78 дБА. Троллейбусы являются наименее шумным видом общественного транспорта: уровни шума при проезде троллейбуса составляют 68-75 дБА. Пониженные уровни шума троллейбусов обусловлены отсутствием двигателя внутреннего сгорания, являющегося основным источником шума автобусов.

Таблица 3 – Уровни шума от различных типов общественного транспорта. Составлено автором на основе результатов акустических измерений.

Тип транспортного средства	**Уровень шума при проезде, дБА**
Трамвай (новый)	75-78
Автобус дизельный Евро-4	78-86
Автобус газовый Евро-5	72-77
Троллейбус	68-75

Результаты оценки акустического загрязнения от общественного транспорта показали устойчивое превышение гигиенических нормативов по уровням шума на территориях жилой застройки, прилегающих к транспортным магистралям, что обусловливает экспозицию значительной части населения города к повышенным уровням шума и связанный с этим риск для здоровья. Снижение акустического загрязнения требует реализации комплекса технических, планировочных и организационных мероприятий, приоритетными из которых являются модернизация подвижного состава на малошумные транспортные средства, установка шумозащитных экранов в зонах плотной жилой застройки.

3.3. Программа природоохранных мероприятий по модернизации транспортного комплекса мегаполиса

Программа природоохранных мероприятий по модернизации транспортного комплекса города Челябинска разработана на основе результатов экологического мониторинга, анализа структуры и эксплуатационных характеристик системы общественного транспорта, оценки эффективности различных технических, планировочных и организационных подходов к снижению негативного воздействия транспорта на окружающую среду. Программа включает комплекс взаимосвязанных мероприятий, направленных на достижение целевых показателей: снижение валовых выбросов загрязняющих веществ от общественного транспорта на 30% к 2030 г. по сравнению с уровнем 2026 г.; увеличение доли электротранспорта (трамваи, троллейбусы) в пассажиропотоке общественного транспорта до 55%; повышение экологической эффективности общественного транспорта (снижение удельных выбросов на пассажиро-километр) на 35%.

Приоритетным направлением программы является обновление подвижного состава общественного транспорта на транспортные средства высоких экологических классов и транспортные средства с нулевыми прямыми выбросами (электротранспорт). Планируется поэтапная замена автобусов экологических классов Евро-3 и Евро-4 на автобусы экологического класса Евро-6 и электробусы.

Электробусы не имеют прямых выбросов загрязняющих веществ в местах эксплуатации, характеризуются пониженными уровнями шума (на 10-15 дБА ниже дизельных автобусов), высокой энергетической эффективностью. Однако есть минусы во внедрении данного вида общественного транспорта, так как, при использовании электробусов, идёт большая нагрузка на электростанции, которые оставляют углеродный след.

Помимо этого, на создание двигателя для электротранспорта нужны редкоземельные ресурсы, а сама утилизация редкоземельных магнитов, является достаточно трудоёмким и неэкологичным процессом.

Модернизация трамвайной системы предусматривает замену трамвайных вагонов, выработавших нормативный срок эксплуатации (более 25 лет), на современные низкопольные трамваи с системами рекуперативного торможения, позволяющими снизить потребление электроэнергии на 25-30% за счет возврата энергии торможения в контактную сеть. К 2030 году планируется приобретение 80 новых трамвайных вагонов, что обеспечит обновление 32% трамвайного парка. Модернизация трамвайной инфраструктуры включает реконструкцию 45 км трамвайных путей с применением технологии «бесшумного трамвая» – укладка пути на шпальную решетку с упругими прокладками из резиновых или полиуретановых материалов, применение виброизолирующих креплений рельсов, регулярная шлифовка рельсов. Эти мероприятия позволят снизить уровни шума от трамваев на 8-12 дБА, устранить визг на кривых участках пути и в стрелочных переводах.

Развитие инфраструктуры для экологически чистого транспорта включает строительство зарядных станций для электробусов, модернизацию тяговых подстанций электротранспорта, строительство компрессорных газозаправочных станций для автобусов, работающих на сжатом природном газе. К 2028 г. планируется строительство 8 зарядных станций для электробусов мощностью 150-300 кВт, обеспечивающих быструю зарядку (за 10-15 минут) на конечных остановках маршрутов. Модернизация 12 тяговых подстанций электротранспорта с установкой систем рекуперации энергии позволит снизить потребление электроэнергии трамваями и троллейбусами на 20-25%. Строительство 3 компрессорных газозаправочных станций для

общественного транспорта обеспечит инфраструктурные условия для увеличения доли газовых автобусов до 80% муниципального парка.

Оптимизация маршрутной сети общественного транспорта предусматривает перераспределение пассажиропотоков с автобусного транспорта на электротранспорт путем развития системы трамвайных и троллейбусных маршрутов, улучшения координации расписаний движения, создания удобных пересадочных узлов. Планируется строительство 15 км новых трамвайных путей для обеспечения трамвайного сообщения с новыми жилыми районами, строительство 8 км новых троллейбусных линий. Создание 12 интермодальных пересадочных узлов «трамвай – троллейбус – автобус» с синхронизацией расписаний движения позволит повысить привлекательность общественного транспорта для населения, увеличить долю поездок на электротранспорте с 40% до 55% от общего числа поездок на общественном транспорте.

Внедрение интеллектуальных транспортных систем (ИТС) включает создание системы диспетчерского управления движением общественного транспорта в реальном времени, системы приоритетного проезда общественного транспорта на регулируемых перекрестках (адаптивные светофоры, предоставляющие «зеленую волну» для общественного транспорта), системы информирования пассажиров о времени прибытия транспорта на остановки. Внедрение ИТС позволит повысить коммерческую скорость общественного транспорта на 15-20%, снизить время простоя на остановках и перекрестках, уменьшить число циклов торможения-разгона, что обеспечит снижение расхода топлива на 8-12% и, соответственно, снижение выбросов загрязняющих веществ.

Планировочные мероприятия по защите селитебных территорий от транспортного загрязнения включают создание защитных зеленых полос, реконструкцию транспортных развязок для снижения локальных

концентраций транспорта. К 2030 г. планируется строительство 22 км шумозащитных экранов высотой 3-4 м вдоль транспортных магистралей в зонах плотной жилой застройки, что обеспечит снижение уровней шума на прилегающих территориях на 8-12 дБА и защиту около 45 тыс. жителей от повышенного акустического воздействия. Создание защитных зеленых полос вдоль 35 км транспортных магистралей (посадка деревьев и кустарников в 3-4 ряда, общая ширина полосы 10-15 м) обеспечит снижение концентраций взвешенных частиц на 20-30%, уровней шума – на 3-5 дБА.[34]

Применение малошумных дорожных покрытий (щебеночно-мастичный асфальтобетон с открытой пористостью, дренирующий асфальтобетон) на участках транспортных магистралей протяженностью 18 км в зонах жилой застройки позволит снизить уровни шума от движения транспорта на 3-5 дБА по сравнению с традиционными плотными асфальтобетонными покрытиями. Реконструкция 5 крупных транспортных развязок с устройством многоуровневых пересечений обеспечит снижение числа остановок и разгонов транспорта, уменьшение локальных концентраций загрязняющих веществ на 20-30% [17].

Экологический эффект от реализации программы выражается в снижении валовых выбросов оксидов азота на 555 тонн в год (30%), взвешенных частиц PM10 – на 37 тонн в год (30%). Ожидаемое снижение средних концентраций NO_2 в зонах влияния транспортных магистралей составит 22-28%, концентраций PM10 – 25-32%, что обеспечит сокращение случаев превышения гигиенических нормативов на 35-45%. Снижение уровней шума в результате модернизации подвижного состава, строительства шумозащитных экранов и реконструкции трамвайных путей составит 8-12 дБА на территориях, прилегающих к транспортным магистралям.

Климатический эффект от реализации программы выражается в снижении выбросов парниковых газов (диоксида углерода, метана) за счет

повышения энергетической эффективности транспорта, увеличения доли электротранспорта, внедрения транспортных средств с пониженным расходом топлива. Ожидаемое снижение выбросов CO2-эквивалента составит около 45-52 тыс. тонн в год, что соответствует 8-10% от выбросов парниковых газов от общественного транспорта города. Внедрение электробусов и трамваев с системами рекуперации обеспечивает дополнительный климатический эффект за счет снижения потребления электроэнергии и, соответственно, выбросов электростанций [3].

Выводы по третьей главе

Результаты оценки акустического загрязнения от общественного транспорта показали устойчивое превышение гигиенических нормативов по уровням шума на территориях жилой застройки, прилегающих к транспортным магистралям, что обусловливает экспозицию значительной части населения города к повышенным уровням шума и связанный с этим риск для здоровья. Снижение акустического загрязнения требует реализации комплекса технических, планировочных и организационных мероприятий, приоритетными из которых являются модернизация подвижного состава на малошумные транспортные средства, установка шумозащитных экранов в зонах плотной жилой застройки.

Программа природоохранных мероприятий по модернизации транспортного комплекса города Челябинска представляет собой комплексный подход к снижению негативного воздействия общественного транспорта на окружающую среду и здоровье населения, основанный на приоритетном развитии электротранспорта, обновлении подвижного состава на транспортные средства высоких экологических классов, развитии транспортной инфраструктуры, внедрении интеллектуальных транспортных

систем, реализации планировочных мероприятий по защите селитебных территорий. Реализация программы обеспечит достижение целевых показателей национального проекта «Экология», улучшение качества городской среды и здоровья населения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование влияния общественного транспорта на окружающую среду города Челябинска позволило получить комплексную оценку экологических последствий функционирования транспортной системы мегаполиса, выявить закономерности пространственно-временной дифференциации химического и акустического загрязнения в зонах влияния транспортных магистралей, разработать научно обоснованную программу природоохранных мероприятий по экологизации транспортного комплекса города.

1. Анализ теоретических и нормативно-правовых аспектов эколого-географического анализа транспортных систем показал, что концепция устойчивого развития городов в отечественной экологии и природопользовании рассматривает транспортный комплекс как критически важный сектор, определяющий экологическое качество городской среды. Система нормирования в области охраны атмосферного воздуха и акустической среды, основанная на установлении предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ и предельно допустимых уровней шума, обеспечивает правовые основы регулирования экологического воздействия транспорта. Методологический арсенал эколого-географической оценки воздействия транспортных систем включает инструментальные методы мониторинга, расчетные методы определения выбросов и моделирования рассеивания, геоинформационные методы пространственного анализа, статистические методы выявления закономерностей.

2. Эколого-географическая характеристика системы общественного транспорта Челябинска выявила, что физико-географические и климатические условия Челябинского промышленного узла характеризуются повышенным потенциалом загрязнения атмосферы, обусловленным высокой

повторяемостью приземных инверсий температуры (48% дней в году), значительной повторяемостью штилей и слабых ветров (20% наблюдений), пониженной высотой слоя перемешивания в холодный период года (300-500 м). Система общественного транспорта города включает трамваи (272 едицицы), троллейбусы (169 единиц), автобусы (1623 единиц муниципального парка), обеспечивающие ежегодный пассажиропоток около 180-200 млн пассажиров. Электротранспорт не имеет прямых выбросов в местах эксплуатации, автобусы, работающие на сжатом природном газе, имеют выбросы оксидов азота на 50-70% ниже дизельных автобусов. Пространственная организация транспортной инфраструктуры характеризуется радиально-кольцевой структурой с концентрацией маршрутов в центральных районах города, где интенсивность движения общественного транспорта достигает 180-220 единиц в час.

3. Мониторинг пространственной дифференциации химического загрязнения в зонах влияния транспортных развязок показал устойчивое превышение гигиенических нормативов по среднесуточным концентрациям диоксида азота, взвешенных частиц PM10 на расстоянии 10 м от края проезжей части. Зона экологического влияния транспортных магистралей с превышением нормативов распространяется на расстояние 10-25 м от дорожного полотна.

Оценка акустического загрязнения от общественного транспорта выявила превышение гигиенических нормативов по эквивалентному уровню звука в дневной период на 15-25 дБА на территориях жилой застройки, расположенных на расстоянии 1 м от транспортных магистралей. Трамваи генерируют шум уровнем 75-78 дБА, дизельные автобусы – 78-86 дБА, газовые автобусы – 72-77 дБА, троллейбусы – 68-75 дБА. Электротранспорт является наименее шумным видом общественного транспорта, что определяет

его приоритетную роль в снижении акустического загрязнения городской среды.

Программа природоохранных мероприятий по модернизации транспортного комплекса города Челябинска предусматривает обновление подвижного состава общественного транспорта на транспортные средства высоких экологических классов и электротранспорт в период 2026-2030 годов, развитие инфраструктуры для экологически чистого транспорта (зарядные станции для электробусов, компрессорные газозаправочные станции), оптимизацию маршрутной сети с увеличением доли электротранспорта в пассажиропотоке до 55%, внедрение интеллектуальных транспортных систем, строительство шумозащитных экранов протяженностью 22 км, создание защитных зеленых полос протяженностью 35 км. Реализация программы обеспечит снижение валовых выбросов оксидов азота на 30%, взвешенных частиц – на 29-30%, предотвращение случаев заболеваний, связанных с воздействием транспортного загрязнения, в год.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипова, Н. В. Экологические проблемы городов Урала / Н.В. Архипова // География и природные ресурсы. – 2019. – № 2. – С. 43-51.
2. Белый, В. В. Малошумные трамвайные пути / В.В. Белый // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 8. – С. 10-13.
3. Бельчик, Т. А. Климатические аспекты устойчивого развития транспортного комплекса мегаполиса / Т.А. Бельчик // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2021. – № 3. – С. 87-95.
4. Бузаев, М. В. Экология автомобильного транспорта / М.В. Бузаев, Ю.В. Трофименко. – Москва : МАДИ, 2018. – 224 с.
5. Буторина, М. В. Разработка научных и методических основ картирования шума транспорта на территории городской застройки : дис. д-р акустик. наук : 01.04.06 / Буторина Марина Валерьевна; ВОЕНМЕХ. – Санкт-Петербург, 2020. – 422 с.
6. Васильев, А. А. Изменение климата на Урале : монография / А. А. Васильев, Д. Ю. Нохрин, Н. В. Глаз [и др.] ; под общей редакцией А. А. Васильева. — Челябинск : Изд-во Челябинского гос. ун-та, 2023. — 86 с. — ISBN 978-5-7271-1900-6.
7. Газомоторное топливо: перспективы использования на городском пассажирском транспорте / под ред. Г. М. Кутенева. – Москва : НИЦ «Инженер», 2012. – 280 с.
8. Глазовский, Н. Ф. Ландшафтно-геохимические основы фонового мониторинга природной среды / Н. Ф. Глазовский, А. И. Злобина. – Москва : Наука, 2019. – 264 с.
9. Городской электротранспорт//Статистика подвижного состава Челябинская область, Челябинск : [сайт]. – URL: fotobus.msk.ru/show.php?loid=1002 (дата обращения: 01.05.2026).

10. Городской электротранспорт//Статистика подвижного состава Челябинск, Трамвай [сайт]. – URL: transphoto.org/show.php?cid=54&t=1 (дата обращения: 01.05.2026).

11. Городской электротранспорт//Статистика подвижного состава Челябинск, Действующие предприятия, троллейбус : [сайт]. – URL: transphoto.org/show.php?loid=485&t=2 (дата обращения: 01.05.2026).

12. ГОСТ 23337-2014. Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 39 с.

13. ГОСТ 27436-87. Автобусы. Шум, создаваемый автобусами внутри пассажирских салонов. Допустимые уровни и методы измерений. – Москва : Издательство стандартов, 1988. – 8 с.

14. ГОСТ Р 41.83-2004. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении выбросов загрязняющих веществ в зависимости от топлива, необходимого для двигателя. – Москва : Стандартинформ, 2005. – 68 с.

15. ГОСТ Р 56059-2014. Производственный экологический мониторинг. Общие положения. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 12 с.

16. ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 28 с.

17. Евгеньев, И. Е. Малошумные дорожные покрытия / И. Е. Евгеньев, Б.Б. Каримов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2005. – № 3. – С. 18-21.

18. Захаров, С. Г. Озёра Челябинской области : учебное пособие / С. Г. Захаров. – Челябинск : АБРИС, 2010. – 128 с.

19. Клинковштейн, Г. И. Организация дорожного движения / Г. И. Клинковштейн, М. Б. Афанасьев. – Москва : Транспорт, 2001. – 247 с.

20. Кузнецова, Е. Л. Оценка воздействия шума на население крупного промышленного города / Е. Л. Кузнецова, А. С. Прейс // Гигиена и санитария. – 2021. – Т. 100. – № 4. – С. 374-379.

21. Методика проведения инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для автотранспортных предприятий (расчетным методом) / Минтранс РФ. – Москва, 1998. – 67 с.

22. МР 2.1.10.0059-12. Оценка риска здоровью населения при воздействии транспортного шума: методические рекомендации. – Москва : Роспотребнадзор, 2012. – 38 с.

23. МУП «Производственное объединение пассажирского автотранспорта». Отчет о производственной деятельности за 2023 год. – Челябинск, 2024. – 124 с.

24. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году: Государственный доклад. – Москва : Минприроды России, 2024. – 498 с.

25. О состоянии окружающей среды Челябинской области в 2023 году: государственный доклад. – Челябинск: Министерство экологии Челябинской области, 2024. – 312 с.

26. Паспорт федерального проекта «Чистый воздух»: утв. президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам (протокол от 24.12.2018 № 16). – М., 2018.

27. Постановление Правительства РФ от 27 февраля 2008 г. № 118 «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту» (с изм. и доп.) // Собрание законодательства РФ. – 2008. – № 10. – Ст. 945.

28. Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую

среду. – Москва : Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 143 с.

29. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. – Москва : Госкомгидромет, 1991. – 693 с.

30. Румянцева А.Я. Климат Челябинской области Учеб. пособие / Челяб. гос. пед. ин-т. — Челябинск : ЧГПИ, 1988. — 83, [2] с. ил., карт.; 20.

31. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – Москва : Роспотребнадзор, 2021. – 469 с.

32. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – Москва : Роспотребнадзор, 2021. – 469 с.

33. Транспорт и устойчивое развитие городов: монография / под ред. В.А. Черникова. – Москва : Изд-во НИУ ВШЭ, 2021. – 312 с.

34. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года: утв. Распоряжением Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р. – Москва, 2021. – 187 с.

35. ТР ТС 018/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств». – М., 2011. – 98 с.

36. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды». – Москва : Собрание законодательства РФ, 2002. – № 2. – Ст. 133.

37. Федеральный закон от 04.05.1999 № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха». – Москва : Собрание законодательства РФ, 1999. – № 18. – Ст. 22.