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

Загрязнение атмосферного воздуха городских агломераций и влияющие неблагоприятные метеорологические условия (на примере г. Челябинска)

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

Проверка на объем заимствований:
63,17 % 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
Кувшинова Каролина Сергеевна
_____

Научный руководитель:
кандидат биологических наук, доцент
_____ Лиходумова Ирина Николаевна

Челябинск
2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ... 3

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА И ОЦЕНКИ ЕГО КАЧЕСТВА ... 6

1.1. Загрязнение атмосферного воздуха: основные понятия и классификации 6

1.2. Неблагоприятные метеорологические условия: факторы и механизмы воздействия ... 8

1.3. Комплексный индекс загрязнения атмосферы как ключевой показатель в оценке качества атмосферного воздуха ... 25

Выводы по первой главе ... 27

ГЛАВА 2. ФОРМИРОВАНИЕ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЯХ НА ПРИМЕРЕ Г. ЧЕЛЯБИНСКА ... 29

2.1. Основные черты климата г. Челябинска ... 29

2.2. Характеристика основных источников загрязнения атмосферного воздуха г. Челябинска ... 30

2.3. Неблагоприятные метеорологические условия г. Челябинска и факторы их формирования ... 38

Выводы по второй главе ... 41

ГЛАВА 3. ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В Г. ЧЕЛЯБИНСКЕ ... 43

3.1. Нормативно-правовые и стратегические основы улучшения качества атмосферного воздуха ... 43

3.2. Реализация экологических мероприятий в Челябинске ... 47

3.3. Экологическое просвещение населения как фактор улучшения качества воздуха ... 50

Выводы по третьей главе ... 54

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ... 56

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ... 58

ПРИЛОЖЕНИЯ ... 64

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях стремительной урбанизации и роста промышленного производства проблема загрязнения атмосферного воздуха крупных городских агломераций приобретает критическое значение. Качество атмосферного воздуха является одним из ключевых факторов, определяющих здоровье населения и продолжительность жизни в городах. Особую остроту эта проблема имеет для промышленных центров с высокой концентрацией производственных мощностей и автотранспорта, где антропогенная нагрузка на атмосферу многократно превышает способность природной среды к самоочищению.

Однако уровень загрязнения воздушного бассейна зависит не только от объема выбросов загрязняющих веществ, но и от потенциала самоочищения атмосферы, который, в свою очередь, определяется метеорологическими условиями. Неблагоприятные метеорологические условия (НМУ), такие как штиль, приземные инверсии температуры и туманы, способны многократно усилить негативный эффект от выбросов. В такие периоды рассеивающая способность атмосферы резко снижается, что приводит к накоплению загрязняющих веществ в приземном слое воздуха, формированию опасных концентраций (включая смог) и возникновению эпизодов экстремально высокого загрязнения. В этой связи изучение механизмов влияния метеорологических факторов (скорости и направления ветра, температурных инверсий, туманов) на качество атмосферного воздуха является необходимой основой для разработки эффективных природоохранных мероприятий.

Челябинск, как один из крупнейших промышленных центров России с многолетней историей металлургического производства, входит в число городов с наиболее высоким уровнем загрязнения атмосферы. Орографические особенности территории и специфические климатические условия создают предпосылки для частого формирования НМУ, что определяет выбор г. Челябинска в качестве объекта для данного исследования.

Актуальность данной работы обусловлено тем, что изучение роли НМУ позволяет оценить влияние природной среды на формирование экологического благополучия/неблагополучия отдельных регионов и создает основу для последующей оценки медико-экологических рисков.

Цель работы: изучить влияние неблагоприятных метеорологических условий на качество атмосферного воздуха городских агломераций и рассмотреть возможные пути его улучшения на примере г. Челябинска.

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

1. Рассмотреть теоретические аспекты загрязнения атмосферного воздуха и роли метеорологических факторов в загрязнении атмосферы.

2. Определить основные источники загрязнения атмосферного воздуха в Челябинске.

3. Проанализировать динамику метеорологических параметров, благоприятствующих накоплению вредных веществ в атмосфере г. Челябинска.

4. Изучить возможные пути улучшения качества атмосферного воздуха в г. Челябинске.

Объект исследования: атмосферный воздух г. Челябинска.

Предмет исследования: влияние неблагоприятных метеорологических условий на загрязнение атмосферного воздуха.

Методы исследования. В работе используются теоретические (анализ научной и методической литературы) и статистические методы исследования.

Научная новизна исследования: в ходе исследования впервые изучена динамика общей продолжительности дней с НМУ за период 2020-2024 гг., а также изучены причины их формирования.

Практическая значимость. Материалы исследования могут быть использованы специалистами природоохранных предприятий, управленцами в сфере экологии регионального уровня, а также представителями естественнонаучного сообщества при оценке качества атмосферного воздуха г. Челябинска.

Структура работы. Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 69 страницах, содержит 20 рисунков и 22 таблицы. Список использованных источников включает в себя 44 наименования.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА И ОЦЕНКИ ЕГО КАЧЕСТВА

1.1. Загрязнение атмосферного воздуха: основные понятия и классификации

Загрязнение атмосферного воздуха – это поступление в воздух или образование в нём загрязняющих веществ в концентрациях, превышающих установленные государством гигиенические и экологические нормативы качества атмосферного воздуха [24].

Загрязнение воздуха имеет различное происхождение. Оно может быть естественным и антропогенным. Естественное загрязнение атмосферного воздуха является природным, то есть оно вызвано естественными природными процессами. Это может быть, например, деятельность вулканов, выветривание горных пород и прочее. Антропогенное загрязнение атмосферы связано с деятельностью человека - с выбросами различных загрязняющих веществ. По масштабу оно значительно превосходит естественное загрязнение атмосферы. Антропогенное загрязнение может быть разных типов: местное, региональное и глобальное. Местное загрязнение характеризуется повышенным содержанием загрязняющих веществ на каких - либо небольших территориях. Это может быть, например, город. Региональное загрязнение, в свою очередь, характеризуется большим пространством, чем местное, но не затрагивает всей планеты. Глобальное же загрязнение связано с изменением атмосферного воздуха в целом. Оно приводит к экологическим изменениям планетарного масштаба.

Кроме этого, загрязнение атмосферы можно классифицировать и по агрегатному состоянию. Именно по агрегатному состоянию выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух могут быть газообразными, жидкими и твердыми. К газообразным выбросам загрязняющих веществ в атмосферу относятся диоксид серы, углеводороды, оксиды азота и другие. К жидким выбросам вредных веществ в атмосферный воздух относятся кислоты,

растворы солей и другие вещества. К твердым же загрязняющим веществам относятся свинец, сажа, канцерогены и другие вещества.

Кроме этого, загрязнение может быть, например, автомобильным, промышленным, энергетическим и другим. Автомобильное загрязнение связано с автомобильными выхлопными газами. В выхлопных газах содержится смесь примерно 200 веществ, среди которых углеводороды, альдегида, углекислый газ, окислы азота и другие вещества.

Энергетическое загрязнение естественно связано с потреблением энергии в городах. Энергия потребляется в различных формах. Например, широко используется ископаемое топливо каменный уголь, нефтепродукты и природный газ. Это уже само по себе определяет состояние загрязнения городской среды продуктами сгорания [12].

Промышленное загрязнение образуется в процессе работ различных отраслей промышленности: металлургии, химической промышленности и других. В атмосферный воздух промышленные предприятия выбрасывают такие загрязняющие вещества, как пыль, углеводород, окислы азота, органические вещества, сернистые газы, хлористые соединения и многие другие.

Выбросы промышленности по своему составу очень разнообразны и по количеству велики. Ветер способен разносить атмосферные выбросы на большие расстояния - до 1-5 км и более.

К основным вредным примесям можно отнести следующие: оксид углерода, сернистый ангидрид, серный ангидрид, сероводород и сероуглерод, окислы азота, соединения фтора, соединения хлора.

Степень загрязнения воздуха основными загрязняющими веществами находится в прямой зависимости от промышленного развития города. Наибольшие максимальные концентрации характерны для городов с численностью населения I более 500 тыс. жителей. Загрязнение воздуха специфическими веществами зависит от вида промышленности, развитой в городе. Если в крупном городе размещены предприятия нескольких отраслей

промышленности, то создается очень высокий уровень загрязнения воздуха [7].

1.2. Неблагоприятные метеорологические условия: факторы и механизмы воздействия

Загрязнение атмосферного воздуха формируется за счет двух основных факторов:

– выбросов вредных веществ в атмосферу промышленными предприятиями и автотранспортом;

– метеорологических и физико-географических условий местности.

Метеорологические и физико-географические условия местности по-разному воздействуют на формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха. В одних случаях они способствуют загрязнению атмосферы, в других, наоборот, - ее самоочищению. Кроме того, при одних и тех же метеорологических условиях одни загрязняющие вещества могут накапливаться в атмосферном воздухе, содержание других - уменьшаться за счет фотохимических и других процессов.

Случаи, когда метеорологические условия способствуют накоплению вредных веществ в приземном слое атмосферы, характеризуются как неблагоприятные метеорологические условия. К ним относятся: штиль, слабый ветер, туман, инверсия температуры и ветер неблагоприятного направления. Эти условия нарушают естественное рассеивание примесей и создают предпосылки для ухудшения качества воздуха.

1. Направление, скорость ветра, турбулентный обмен

Возникновение ветра связано с разностью атмосферного давления и температуры воздуха в различных районах земной поверхности. Чем больше разность давления (температуры), тем больше скорость ветра.

Между движущимся воздухом и полем атмосферного давления существует непрерывная взаимосвязь. В стационарном состоянии связь между полем давления и горизонтальным движением воздуха описывается так

называемым барическим законом ветра. Этот закон говорит о том, что выше приземного слоя трения, т.е. примерно с высоты 1000 м, движение воздуха происходит по изобарам или по линиям одинакового атмосферного давления. При этом в северном полушарии область низкого давления остается слева, а область высокого давления - справа. Вследствие трения между воздушными потоками и земной поверхностью в нижнем слое атмосферы, простирающемся до высоты 1000 м над уровнем моря, возникают торможение воздушного течения и отклонение его от изобар, так что воздух здесь движется под некоторым углом к изобарам в направлении от области повышенного давления к области пониженного давления.

Угол отклонения воздушного потока от изобары изменяется в зависимости от состояния земной поверхности и интенсивности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы.

Горизонтальное движение воздуха характеризуется направлением и скоростью ветра, вертикальные пульсации воздуха описываются турбулентностью потока.

Направление, скорость ветра и его турбулентные колебания являются основными метеорологическими факторами, от которых напрямую зависит уровень загрязнения атмосферного воздуха, так как движения воздуха вызывают рассеяние (размывание) и упорядоченный перенос примеси. Если размеры атмосферных вихрей меньше размеров облака или факела примеси, они рассеивают примесь, если больше - переносят. Под действием ветра примесь рассеивается как по направлению движения, так и в результате турбулентного обмена в поперечном и вертикальном направлении.

При размещении промышленных объектов, имеющих выбросы вредных веществ в атмосферу, необходимо грамотно пользоваться зависимостью между уровнем загрязнения атмосферного воздуха и господствующим направлением ветра. Только так можно избежать многих неприятных последствий, связанных с повышением уровня загрязнения атмосферного воздуха в местах проживания людей.

Основное правило размещения промышленных предприятий, имеющих выбросы вредных веществ в атмосферу, состоит в том, что нельзя их строить со стороны господствующего переноса воздушных масс на жилые объекты.

Зависимость уровня загрязнения атмосферного воздуха от скорости ветра определяется высотой источника выброса. При выбросах из высоких труб максимальные концентрации примеси у земли наблюдаются при так называемой опасной скорости ветра. Это вызвано тем, что выбрасываемая газовоздушная смесь имеет определенную скорость выхода из трубы и в случае ее перегрева относительно окружающего воздуха обладает плавучестью. При малых скоростях ветра увеличивается эффективный подъем факела и концентрации его у земли снижаются. В случаях выбросов из низких и неорганизованных источников увеличение концентрации примесей наблюдается при слабых ветрах за счет скопления в приземном слое атмосферы. Для низких и неорганизованных источников опасными являются скорости ветра 0-1 м/с, при которых концентрации примесей в приземном слое на 30-70 % выше, чем при больших скоростях. Для высоких источников опасными являются скорости ветра 4-5 м/с.

Ветер более 6 м/с уже способен вынести загрязняющие вещества из города как от низких, так и от высоких источников. Установлено, что такой ветер уносит за черту города около 75% загрязняющих веществ. При сильных ветрах расстояние переноса примесей от одиночного источника может быть очень значительными.

Таким образом, при исследовании условий рассеивания примесей в городах следует учитывать, как повторяемость малых скоростей ветра 0-1 м/с, так и повторяемость скоростей ветра >6 м/с. Причем, несомненно, важное значение для скопления примесей имеет не только сила, но и продолжительность ветра определенной скорости, особенно слабого. От скорости ветра зависит и форма факела выбрасываемой смеси. При слабом ветре дым поднимается почти вертикально, а при сильном - распространяется горизонтально вдоль земной поверхности.

Повторяемость скорости ветра 0-1 м/с является одним из основных метеорологических факторов, определяющих потенциал загрязнения атмосферы, так как застой воздуха при слабых ветрах или штилях приводит к накоплению вредных примесей в приземном слое атмосферы.

2. Температура воздуха

Температура воздуха является одним из важнейших экологических факторов, влияющих на интенсивность обменных процессов. Этот фактор относится к числу постоянно действующих: количественное его выражение характеризуется широкими географическими, сезонными и суточными изменениями.

Высокая по сравнению со средними величинами температура воздуха при слабых ветрах способствует увеличению концентрации примесей за счет испарения летучих веществ.

При понижении температуры воздуха происходит более быстрый переход газообразной компоненты в аэрозольную. Кроме того, при пониженных температурах воздуха усиливается подъем перегретых выбросов за счет увеличения разности температур между выбрасываемыми примесями и окружающим воздухом, что способствует уменьшению концентраций загрязняющих веществ у поверхности земли.

Наибольшее влияние на уровень загрязнения атмосферного воздуха оказывает непосредственно не сама температура воздуха, а ее вертикальное и горизонтальное распределение, т.е. вертикальная стратификация и горизонтальный градиент температуры.

Вертикальная стратификация и горизонтальный градиент температуры, так же как направление и скорость ветра могут способствовать накоплению примесей в атмосфере и их рассеиванию.

У поверхности земли различают три вида вертикальной температурной стратификации: нормальную (неустойчивую), изотермическую (безразличную) и инверсионную (устойчивую).

Под нормальной (неустойчивой) стратификацией температуры воздуха подразумевают ее понижение с высотой. При этом вертикальный градиент температуры (γ) будет больше нуля. Атмосферный воздух у земли как более теплый и легкий поднимается вверх, в то время как тяжелый холодный воздух с высоты опускается вниз. Происходит турбулентное перемешивание воздуха и разбавление загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, что приводит к уменьшению общего уровня загрязнения атмосферного воздуха. Но даже при нормальном распределении температуры воздуха в условиях сильного турбулентного перемешивания может происходить резкое забрасывание загрязненного воздуха от факела выброса к земле. В этом случае общий уровень загрязнения атмосферного воздуха увеличивается.

Под изотермической (безразличной) стратификацией температуры воздуха подразумевается ее постоянство с высотой. Вертикальный градиент температуры $\gamma=0$. При таких ситуациях почти отсутствует вертикальное турбулентное перемешивание, а уровень загрязнения атмосферного воздуха существенно не меняется.

При инверсионном (устойчивом) распределении температуры воздуха происходит ее повышение с высотой ($\gamma<0$) (инверсия температуры). В этих условиях холодный тяжелый воздух остается у земли, а теплый воздух на верхней границе слоя инверсии поднимается вверх, поэтому выше слоя инверсии наблюдается интенсивное турбулентное перемешивание, а в слое инверсии происходит застой атмосферного воздуха и резкое увеличение концентрации загрязняющих веществ [33].

Вредные вещества могут концентрироваться как непосредственно у земли, так и выше – в зависимости от высоты нижней границы инверсии. В метеорологии различают приземные инверсии (начинаются от поверхности земли) и инверсии свободной атмосферы (приподнятые), при которых температура воздуха повышается от некоторой высоты над земной поверхностью.

Приземная инверсия начинается от самой подстилающей поверхности (почвы, снега или льда). Над открытой водой такие инверсии наблюдаются редко и не так значительны. У подстилающей поверхности температура самая низкая, с высотой она растет, причем этот рост может распространяться на слой в несколько десятков и даже сотен метров. Затем инверсия сменяется нормальным падением температуры с высотой.

В зависимости от условий образования приземные инверсии разделяются на радиационные и адвективные.

Радиационные инверсии возникают при охлаждении приземного слоя атмосферы, соприкасающегося с деятельной поверхностью, которая выхолаживается путем излучения (рисунок 1). По мере удаления от деятельной поверхности температура воздуха повышается. Таким образом, в нижнем слое атмосферы температура с высотой растет. Такие инверсии летом развиваются ночью, а зимой — днем. В связи с этим радиационные инверсии разделяют на летние (ночные) и зимние.

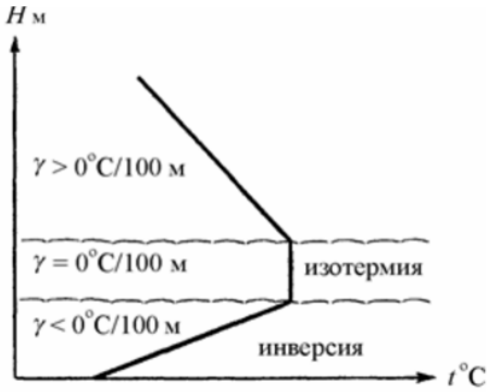


Рисунок 1 – Радиационная инверсия

Летние (ночные) инверсии начинают развиваться вечером, после захода солнца. В течение ночи они усиливаются и утром достигают максимальной толщины и глубины. После восхода солнца деятельная поверхность и прилегающий к ней воздух прогреваются и инверсия разрушается. Толщина ночных инверсий зависит от длительности выхолаживания воздуха и от

интенсивности турбулентного перемешивания. Она колеблется от 10-15 до 200-м. Развитию ночных инверсий благоприятствует ясное небо и слабый ветер.

Зимние инверсии в ясную погоду, когда охлаждение деятельной поверхности изо дня в день увеличивается, могут сохраняться несколько суток и даже недель, немного ослабевая днем и снова усиливаясь ночью. Толщина таких инверсий составляет несколько сотен метров, а иногда достигает 2 км и более.

Разновидностью радиационных инверсии являются орографические (рисунок 2), в которых радиационный эффект усилен особенностями орографии [35].

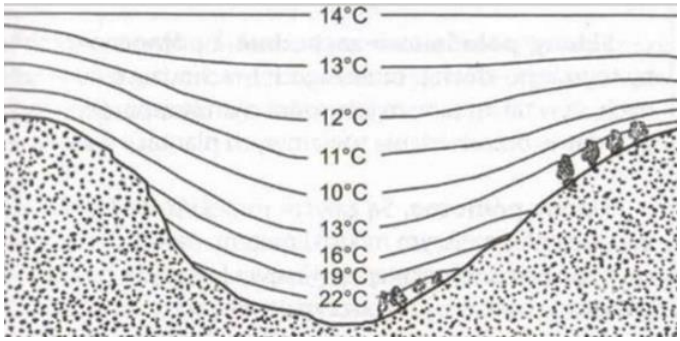


Рисунок 2 – Орографическая инверсия

В условиях холмистой местности воздух, который охлаждается стекает с возвышенностей в котловины или низины. Возникновению орографической инверсии способствуют условия пересеченного холмистого или горного рельефа. В горах и на возвышенностях при определенных метеорологических условиях (антициклональная, безветренная погода) холодный, более плотный воздух под силой тяжести стекает с возвышенных мест в понижения и там скапливается, образуя озера холодного воздуха. При этом более высокие температуры наблюдаются на склонах. В ночные часы при ясной антициклональной погоде в результате стекания холодных воздушных масс в долины, где происходит сильное выхолаживание поверхности, возможно возникновение поздневесенних и летних заморозков. При циклональных погодных условиях температурные инверсии выражены слабее [10].

Адвективные инверсии образуются при адвекции, т.е. при натекании теплого воздуха на более холодную деятельную поверхность (рисунок 3). Примером может служить вторжение теплого морского воздуха на материк в зимнее время года. В этом случае нижние слои натекающего воздуха отдают часть своего тепла деятельной поверхности, вследствие чего образуется инверсия.

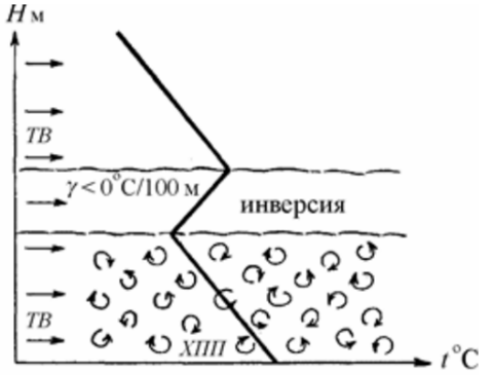


Рисунок 3 – Адвективная инверсия

К адвективным инверсиям относятся весенние (или снежные) инверсии, возникающие при адвекции воздуха, имеющего температуру выше 0°С, на поверхность, покрытую снегом. На таяние снега нижележащие слои затрачивают большое количество тепла, в результате чего их температура понижается до 0°С. В вышележащих слоях при этом сохраняются более высокие температуры.

Инверсия в свободной атмосфере наблюдается в некотором слое воздуха, лежащем на той или иной высоте над земной поверхностью (рисунок 4). Основание инверсии может находиться на любом уровне в тропосфере, однако наиболее часты инверсии в пределах нижних 2 км (если не говорить об инверсиях на тропопаузе, собственно уже не тропосферных). Толщина инверсионного слоя также может быть самой различной - от немногих десятков до многих сотен метров. Наконец, скачок температуры на инверсии, т.е. разность температур на верхней и нижней границах инверсионного слоя, может колебаться от 1°С и меньше до 10 – 15°С и больше.

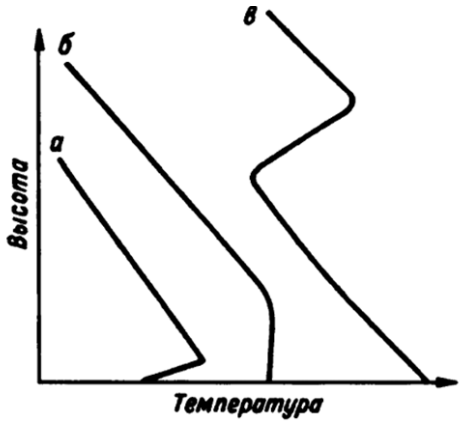


Рисунок 4 – Типы распределения температуры с высотой: а-приземная инверсия, б-приземная изотермия, в-инверсия в свободной атмосфере

Случается, что приземная инверсия, простирающаяся до значительной высоты, сливается с вышележащей инверсией в свободной атмосфере. Тогда повышение температуры начинается от самой земной поверхности и продолжается до большой высоты, а скачок температуры оказывается особенно значительным.

Иногда инверсия непосредственно переходит в вышележащую изотермию. Нередко над тем или иным районом наблюдаются в свободной атмосфере две (или больше) инверсии, разделенные слоями с нормальным убыванием температуры.

Инверсии наблюдаются не над отдельными точками земной поверхности. Слой инверсии непрерывно простирается над значительной площадью, особенно в случае инверсий в свободной атмосфере [39].

По условиям образования инверсии свободной атмосферы разделяются на следующие типы: инверсии турбулентности (трения), динамические, антициклонические (сжатия, оседания) и фронтальные.

Инверсии турбулентности (рисунок 5) образуются на высоте несколько сотен метров, т.е. над слоем атмосферы, в котором особенно сильно развивается турбулентное перемешивание, обусловленное трением воздуха о поверхность земли. В устойчиво стратифицированном слое атмосферы с ненасыщенным водяным паром в результате турбулентного перемешивания вертикальный градиент температуры увеличивается до 1°С/100 м. Объясняется это тем, что

поднимающиеся порции воздуха адиабатически охлаждаются и понижают температуру вышележащих слоев. Таким же образом опускающиеся порции воздуха нагреваются и повышают температуру нижележащих слоев. В результате в слое с усиленной турбулентностью кривая стратификации начинает приближаться к сухой адиабате.

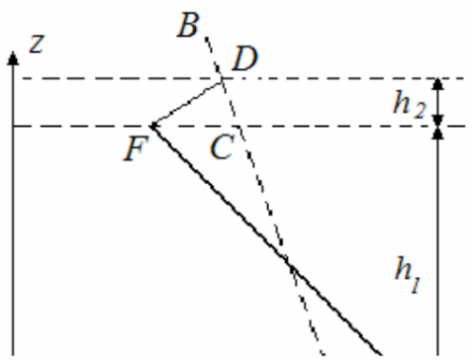


Рисунок 5 – Инверсия турбулентности: h_1-турбулентный слой, h_2-слой резкого ослабления турбулентности

На рисунке 5 линия AB – кривая стратификации до начала перемешивания, а линия EF – кривая стратификации, установившейся в нижней части слоя в результате интенсивного турбулентного перемешивания. Выше, в слое резкого убывания турбулентности, стратификация выражается линией FD. Эта линия показывает, что над слоем интенсивного турбулентного перемешивания образуется инверсия. Инверсия турбулентности является переходным типом от приземной инверсии к инверсии свободной атмосферы. Толщина такой инверсии обычно не превышает нескольких десятков метров.

Динамические инверсии возникают в слоях с большими скоростями ветра. Причина их образования заключается в том, что воздушный поток, движущийся с большой скоростью $V_{макс}$, засасывает воздух из выше- и нижележащих слоев, в которых скорость ветра меньше (V_1 и V_2). В результате на верхнем уровне слоя больших скоростей развиваются нисходящие движения, а на нижнем — восходящие. В нисходящих потоках температура воздуха адиабатически растет на 1°С/100 м, а в восходящих понижается на ту

же величину. Таким образом, возникает перераспределение температуры и в средней части слоя больших скоростей развивается инверсия (рисунок 6).

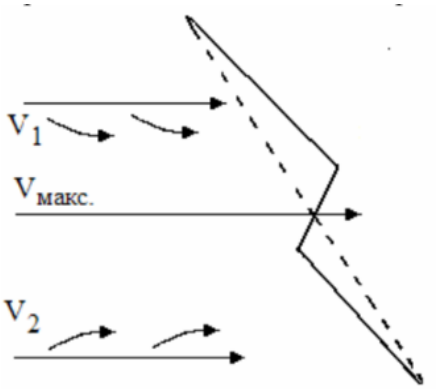


Рисунок 6 – Динамическая инверсия

Антициклонические инверсии (сжатия, оседания) образуются в областях повышенного давления. В центре таких областей возникают нисходящие потоки воздуха. Вследствие более высокого давления на нижних уровнях опускающийся воздух сжимается и растекается по горизонтали от центра области к периферии, не достигая земной поверхности. Температура каждой опускающейся порции возрастает на 1 °С/100 м. Порции, опустившиеся из более высоких слоев, проходят большее расстояние по вертикали и поэтому больше нагреваются.

Фронтальные инверсии образуются во фронтальных зонах (рисунок 7).

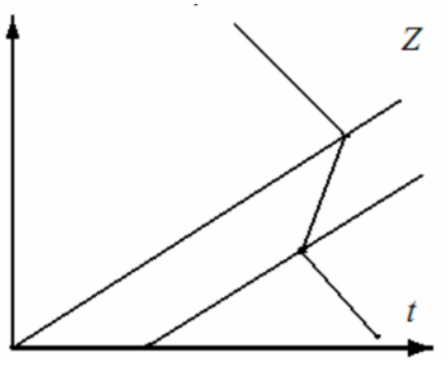


Рисунок 7 – Фронтальная инверсия

Фронтальная зона является переходной между холодным и теплым воздухом. В ней наблюдается резкое изменение вертикального градиента

температуры и может возникнуть изотермия или даже инверсия. Высота нижней границы инверсионного слоя над данным пунктом зависит от расстояния между этим пунктом и линией фронта на земной поверхности. Чем дальше находится пункт от линии фронта, тем выше располагается инверсия [35].

В условиях инверсий большое значение имеет высота источника выброса. Если слой инверсии располагается над источником выброса, то он, как правило, затрудняет подъем отходящих газов и способствует их накоплению в приземном слое воздуха. При расположении слоя инверсии ниже уровня выброса вероятность загрязнения приземного слоя воздуха в данной местности резко уменьшается. Однако такие ситуации способствуют переносу примесей на большие расстояния и возрастает опасность значительного загрязнения удаленных территорий. В таких условиях выбросы от высоких источников могут распространяться на расстояние свыше 1000 км.

Приземные инверсии способствуют повышению концентрации примесей у земли при наличии низких источников выбросов, а приподнятые инверсии - при наличии высоких выбросов. В случае приземных инверсий неблагоприятными являются малые скорости ветра 0-1 м/с, а для приподнятых - 5-6 м/с [33].

Помимо вертикальной стратификации существенное влияние на перенос и накопление загрязняющих веществ в атмосфере оказывает горизонтальный градиент температуры. Горизонтальный градиент температуры — это характеристика изменения температуры воздуха в горизонтальном направлении (по нормали к изотерме) на единицу расстояния. Чаще всего за единицу расстояния принимают 100 км [36].

В городских условиях горизонтальный градиент температуры определяется разностью температур воздуха между центром города и его окрестностями: $\Delta T = T_{гор} - T_{окр}$.

Практически во всех городах (малых и больших) наблюдается тенденция к повышению температуры воздуха в центре по сравнению с температурой

воздуха в окрестностях. Связывают это явление со многими факторами: с наличием большого количества примесей в воздухе и вызванными ими изменениями в радиационном и термическом режимах; с теплоемкостью зданий, сильно нагретых днем и медленно остывающих ночью; с выделением энергии в результате деятельности энергетических источников; с резким уменьшением испарения с подстилающей поверхности в городе и рядом других причин.

Повышение температуры воздуха над городом способствует образованию так называемого острова тепла (рисунок 8).

Форма и интенсивность острова тепла обладают большой изменчивостью. При смене направления ветра остров тепла может смещаться в подветренную часть города.

Теплый воздух, концентрируясь в центре города, поднимается вверх, перенося вместе с собой часть вредных веществ, затем распространяется в стороны и опускается вниз на окраины города. При расширении воздух охлаждается и от окраин города движется в приземном слое по направлению к центру. Образуется самоподдерживающая система циркуляции, которая может быть разрушена только под воздействием сильного ветра.

Вследствие сложной структуры острова тепла поле ветровых потоков, создаваемое горизонтальным перепадом приземных температур, также оказывается достаточно сложным. Скорость потока, определяемая перепадом температур, составляет 1-3 м/с.

Остров тепла может прослеживаться до высоты 100-200 м над городом. В среднем верхняя граница перегретого воздуха достигает около 100 м.

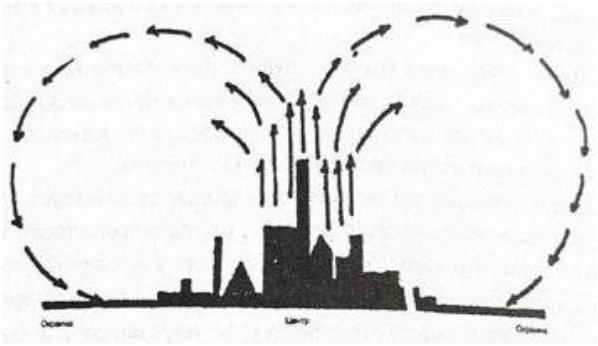


Рисунок 8 – Остров тепла над городом

Наличие острова тепла в городе можно рассматривать как тепловое загрязнение (это температурная инверсия, приводящая к повышенному загрязнению, образованию туманов и пр.).

С точки зрения климатологии для городов, расположенных в северных широтах, остров тепла может быть иногда положительным фактором, так как уменьшает воздействие снега и холодных ветров, снижает потребности в отоплении зданий, уборке улиц от снега. Зато для городов, расположенных в южных широтах, практически во всех случаях остров тепла - явление неблагоприятное для жителей.

3. Туманы и смоги

Туманы - метеорологическое явление, при котором дальность видимости становится менее 1 км хотя бы в одном направлении за счет скопления в атмосфере очень мелких, не различимых глазами капелек воды или кристаллов льда (рисунок 9). Аналогичное явление при горизонтальной видимости 1 км и более называют дымкой.



Рисунок 9 – Туман в г. Челябинске

Образование туманов связано со сложными процессами, обусловленными как температурой и влажностью воздуха, так и особенностями подстилающей поверхности. Необходимыми условиями для образования тумана являются большая насыщенность воздуха водяным паром и понижение температуры воздуха.

Важную роль в образовании тумана играет относительная влажность воздуха. При положительных температурах воздуха относительная влажность в туманах чаще всего бывает более 90 %. В холодный период она может быть порядка 80-90 %, при температурах -30°С и ниже достаточна относительная влажность порядка 70 %.

Значение относительной влажности, при которой начинаются конденсация водяного пара и образование тумана, зависит от природы и размеров ядер конденсации в приземном слое атмосферы. Так, при ядрах, представляющих собой частицы различных солей, кислот, аэрозолей и пр., образование капель может иметь место и в ненасыщенном воздухе, т.е. при относительной влажности менее 100%.

Влияние туманов на содержание примесей в воздухе носит сложный характер. При туманах нередко создаются специфические условия распределения метеорологических величин, способствующих увеличению

концентрации примесей у земли. Примеси частично поглощаются водяными каплями, при их растворении иногда образуются новые, более токсичные вещества. Например, в туманах за счет большого содержания влаги происходит быстрое закисление сернистого ангидрида до образования серного ангидрида (SO_3). Это обусловлено тем, что обычно в каплях тумана содержатся некоторые микроэлементы, обладающие каталитическими свойствами. В их присутствии окисление происходит более интенсивно. Ввиду того что серный ангидрид при взаимодействии с водой образует серную кислоту, можно для простоты говорить о частичном окислении сернистого газа в атмосфере до серной кислоты и образовании ее аэрозоля.

При образовании серной кислоты происходит и определенное возрастание весовой концентрации вредной примеси. Так, например, при окислении 1 г сернистого ангидрида с относительной молекулярной массой 64 образуется примерно 1,5 г серной кислоты с относительной молекулярной массой 98. То же происходит и с другой распространенной примесью - диоксидом азота. В туманах при взаимодействии с влагой он превращается в азотную кислоту.

Таким образом, при туманах происходит не только увеличение концентрации загрязняющих веществ, но и усиление их токсичности. В туманах концентрации примесей могут возрастать на 80-90%. Рост концентрации примесей происходит пропорционально продолжительности или устойчивости туманов, т.е. чем продолжительнее туман, тем интенсивнее загрязнение атмосферного воздуха.

Почти над каждым крупным городом можно заметить последствие загрязнения – смог, пагубно влияющий на жизнь и здоровье людей, животных и растения.

Смог, в отличие от тумана, – это самостоятельное явление, отличающееся от тумана тем, что ухудшение видимости в нем происходит не за счет скопления большого количества влаги, а за счет большого количества загрязняющих веществ, поступающих с выхлопными газами автомобилей и

промышленных предприятий. Эти газы в результате фотохимических процессов под влиянием солнечной радиации превращаются в аэрозоли, которые и снижают видимость обычно до 1000-1500 м при ясном небе и хорошей вертикальной видимости [33].

Фотохимический смог – это форма смога, характеризующая загрязнение атмосферы, при котором высокие концентрации оксидов азота и летучие органические соединения смешиваются в результате действия солнечного света, способствующего серии фотохимических реакций, которые приводят к образованию озона и других вторичных загрязнителей.

Для возникновения фотохимического смога необходимо сочетание нескольких условий: низкая влажность, отсутствие ветра, способствующее застаиванию больших масс воздуха, и, что самое главное, наличие в нем высоких концентраций оксидов азота и углеводородов.

В атмосферу поступают разнообразные по строению углеводороды. Наиболее типичным органическим загрязнителем атмосферы является метан CH_4. Антропогенные углеводороды поступают в атмосферу в результате выбросов транспорта и промышленности.

В технике и промышленности углеводороды используются в качестве энергоносителей, например, природный газ, пропан, бензин, растворители для красок и чистящих средств и др.

Образование фотохимического смога происходит в результате последовательности реакций окисления углеводородов, протекающих сопряженно с окислением оксида азота. В ходе этих реакций, главным образом, выделяется озон.

Таким образом, в тропосфере в процессе окисления под действием солнечного света происходит накопление озона, вследствие чего окислительный потенциал воздуха увеличивается [20].

1.3. Комплексный индекс загрязнения атмосферы как ключевой показатель в оценке качества атмосферного воздуха

Состояние загрязнение воздуха несколькими веществами, наблюдаемые в атмосфере города, оценивается с помощью комплексного показателя индекса загрязнения атмосферы (ИЗА) [37].

Комплексный индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) применяется для сравнительной оценки загрязненности отдельных районов города, отдельно взятых городов с установлением их приоритетности по уровню загрязнения и тенденций загрязненности. Он представляет собой относительный показатель, величина которого зависит от концентрации вещества в анализируемой точке, его ПДК (максимальный уровень содержания вредного вещества в воздухе) и количества веществ загрязняющих атмосферу.

Комплексный индекс загрязнения атмосферы рассчитывается на основе данных стационарных наблюдений с учетом всей номенклатуры определяемых вредных веществ.

В основу расчета комплексного индекса загрязнения атмосферы приняты следующие положения:

– опасность воздействия на здоровье человека зависит от отдельных вредных веществ, от класса опасности конкретного вещества;

– по мере увеличения превышения ПДК веществ или ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) и уровней вредных физических и иных воздействий на комплектующий индекс, установленные в санитарных нормах и правилах, возрастает опасность воздействия на здоровье человека.

Для расчета показателя загрязнения атмосферы (ИЗА) используются средние значения концентраций различных загрязняющих веществ, деленные на предельно допустимую концентрацию (ПДК) и приведенные к вредности диоксида серы.

Степень загрязненности атмосферы одним веществом выражается в общем виде через единичный (парциальный) индекс загрязненности ИЗА, который рассчитывается по формуле:

$$ИЗА_i = \left(\frac{C_i}{ПДК_i}\right)^{K_i} (1),$$

где C_i – средняя концентрация i-го вещества;

$ПДК_i$ – среднесуточная предельно допустимая концентрация i-го вещества;

K_i – безразмерная константа приведения степени вредности вещества к вредности сернистого газа.

Среднее значение константы в зависимости от класса опасности вещества берется по табл. 1.

Таблица 1 - Среднее значение константы по классам опасности вещества

Класс опасности	Характеристика класса	Константа
1	Чрезвычайно опасные	1,5
2	Высокоопасные	1,3
3	Умеренно опасные	1,0
4	Малоопасные	0,85

В соответствии с существующими методами оценки уровень загрязнения считается:

- низким при ИЗА ниже 5,
- повышенным при ИЗА от 5 до 6,
- высоким при ИЗА от 7 до 13
- очень высоким при ИЗА, равном или больше 14.

Ежегодно выделяются города с самым высоким уровнем загрязнения воздуха, в которых ИЗА равен или выше 14.

Для оценки загрязненности атмосферы отдельных районов города несколькими веществами при составлении ежегодного списка городов с

наибольшим уровнем загрязнения атмосферы рассчитывается комплексный индекс загрязнения атмосферы для одинакового количества примесей. Для расчета комплексного индекса загрязнения атмосферы ($ИЗА_5$) используют значения единичных индексов ИЗА тех пяти веществ, у которых эти значения наибольшие:

$$ИЗА_5=\sum_{i=1}^{n_5} ИЗА_i \quad (2),$$

Величины $ИЗА_5$ распределяют по загрязненности атмосферы таким образом:

- менее 2,5 – чистая атмосфера;
- 2,5 – 7,5 – слабо загрязненная атмосфера;
- 7,5 – 12,5 – загрязненная атмосфера;
- 12,5 – 22,5 – сильно загрязненная атмосфера;
- 22,5 – 52,5 – высоко загрязненная атмосфера;
- более 52,5 – экстремально загрязненная атмосфера [27].

При оценке степени экологической ситуации в регионах России (включая города) основное внимание уделяют загрязнителям атмосферы с наиболее значимыми концентрациями: оксиды азота, диоксид серы, бензапирен, формальдегид, фенолы, свинец и пылевые частицы [18].

Выводы по первой главе

Для крупных городских агломераций в результате интенсивной хозяйственной деятельности создаются особые метеорологические условия, которые определяют формирование специфического городского климата.

Качество атмосферного воздуха городских агломераций формируется под воздействием совокупности антропогенных и природно-климатических факторов. Основными источниками загрязнения являются промышленные предприятия, теплоэнергетика и автотранспорт, выбросы которых содержат оксиды азота, диоксид серы, бензапирен, формальдегид, фенолы, свинец и пылевые частицы.

Существенное влияние на уровень накопления примесей в приземном слое атмосферы оказывают неблагоприятные метеорологические условия, которые препятствуют естественному рассеиванию и приводят к формированию зон устойчивого загрязнения. Условиями, которые способствуют накоплению поллютантов в атмосфере, считаются: штиль, слабые ветры неблагоприятного направления, туманы, температурные инверсии.

Для оценки загрязнения воздушного бассейна населенных пунктов используется комплексный индекс загрязнения атмосферы, который показывает степень превышения безопасных норм с учетом класса опасности веществ.

ГЛАВА 2. ФОРМИРОВАНИЕ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЯХ НА ПРИМЕРЕ Г. ЧЕЛЯБИНСКА

2.1. Основные черты климата г. Челябинска

По общим характеристикам климат Челябинска относится к умеренному континентальному. По основным климатическим показателям территория города Челябинска характеризуется параметрами, типичными для лесостепной зоны Зауралья.

Солнечное сияние на территории города составляет 2066 часов в год, что на 481 час больше, чем над Москвой. Средняя температура января на территории Челябинска (как и для всей лесостепной зоны) равняется минус 15,5–17,5° С. В суровые зимы она может опускаться до минус 25–29° С, а в отдельные тёплые зимы средняя температура января составляет минус 8–9° С. Абсолютный минимум температуры воздуха на территории города достигал минус 42–49° С. Средняя температура июля для Челябинска равняется плюс 18–19° С. Абсолютный максимум температуры, характерный для лесостепной зоны и зафиксированный в ее пределах, составил плюс 42,0° С.

По данным метеонаблюдений годовое количество осадков составляет 439 мм. Экстремальные осадки зафиксированы 18 августа 1998 года в Челябинске (в районе Коркино), когда за 1 час выпало 45 мм осадков.

Постоянный снежный покров в Челябинске образуется 15 – 18 ноября и сохраняется 145 – 150 дней. Высота снежного покрова составляет 30 – 40 см, но в малоснежные зимы бывает на 10 – 15 см меньше. Метели наблюдаются в течение 30 – 35 дней, общей продолжительностью 220 – 270 часов. Глубина промерзания почвы на территории города колеблется от 90 до 130 см.

Ветровой режим в Челябинске зависит от особенностей размещения основных центров действия атмосферы. В январе–мае преобладают ветры южного и юго-западного направления со средней скоростью 3 – 4 м/с. При метелях максимальная скорость увеличивается до 16 – 28 м/с. В июне–августе

ветер дует с запада и северо-запада, средняя скорость не увеличивается, но при грозах наблюдается кратковременное шквалистое усиление ветра до 16 – 25 м/с. В сентябре–декабре ветер поворачивает на южный и юго-западный, средняя скорость ветра составляет 3 м/с, максимальная – 18 – 28 м/с [19].

Таким образом, климат Челябинска формируется под влиянием его расположения в лесостепной зоне Зауралья и характеризуется умеренно континентальными чертами, относительно невысоким годовым количеством осадков, устойчивым снежным покровом и значительной продолжительностью солнечного сияния.

2.2. Характеристика основных источников загрязнения атмосферного воздуха г. Челябинска

Из года в год уровень загрязнения воздуха в Челябинске остаётся повышенным. В частности, по данным годового обзора Челябинского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС), в 2022 году уровень загрязнения воздуха в Челябинске классифицировался как «очень высокий». Эта оценка основана на замерах содержания формальдегида, марганца, бенз(а)пирена, фторида водорода и озона.

Среднее за 2022 год содержание вредных веществ в воздухе превышало предельно допустимые концентрации (ПДК) в несколько раз:

- формальдегида – в 7,2 раза,
- марганца – в 2,4 раза,
- бенз(а)пирена – в 1,7 раза,
- фторида водорода – в 1,5 раза,
- озона – в 1,2 раза.

В 2023 году и первом квартале 2024 года также фиксировались серьёзные превышения безопасных концентраций вредных веществ. Так, среднемесячные концентрации формальдегида в воздухе были выше нормы в

1,2–2,6 раза, кроме того, в отдельные дни концентрация вредных веществ превышала разовую ПДК в 1,1–7,8 раза.

Высокий уровень загрязнения воздуха в Челябинске объясняется тем, что в городе работают как передвижные (автотранспорт), так и стационарные источники выбросов (промышленные предприятия, ТЭЦ, котельные).

1. Стационарные источники выбросов

Среди крупных промышленных предприятий, являющихся источниками загрязнения, выделяются: «Челябинский металлургический комбинат» (входит в число ведущих производителей металлопродукции РФ), «Челябинский электрометаллургический комбинат» (один из крупнейших производителей ферросплавов в России, обеспечивает до 80% отечественного рынка), АО «Челябинский цинковый завод», ПАО «Форвард Энерго» (городские ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, ТЭЦ-3, ТЭЦ-4) (рисунок 10). От них в атмосферу поступают выбросы оксидов азота и серы, тяжелых металлов (свинца, кадмия, ртути), летучих органических соединений (ЛОС) и взвешенных частиц (сажи, пыли). Изношенное оборудование и недостаточная эффективность очистных систем на отдельных предприятиях и недостаточная эффективность очистных систем только усугубляют ситуацию [43].

Челябинские ТЭЦ, использующие преимущественно уголь, выделяют значительное количество диоксида серы, оксидов азота, тяжелых металлов и твердых частиц. Несмотря на постепенное внедрение современных технологий очистки, теплоэнергетика остается значимым источником загрязнения. Множество котельных, обеспечивающих теплом жилые дома и организации, также вносят свою лепту в загрязнение воздушной среды, особенно в зимний период, выбрасывая оксиды азота, серы и твердые частицы [21].

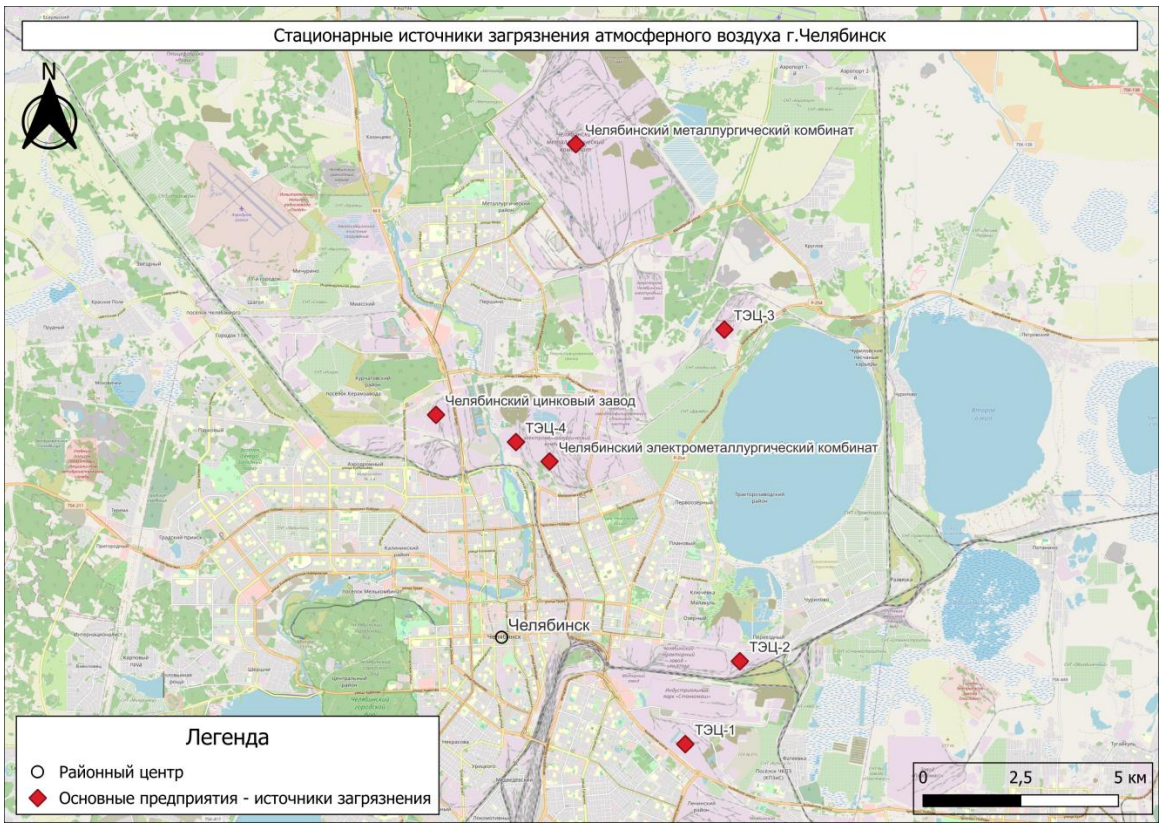


Рисунок 10 – Стационарные источники загрязнения атмосферного воздуха г. Челябинска

Особенность стационарных источников загрязнения, в отличие от передвижных, заключается в том, что их выбросы производятся на большой высоте (через трубы). Это обеспечивает распространение загрязнений на обширную территорию – чем выше труба, чем дальше переносится факел. В Челябинске основные промышленные предприятия сконцентрированы в северо-восточной части города (рисунок 10). Их факелы, накладываясь друг на друга под действием преобладающих юго-западных и западных ветров, формируют единую зону устойчивого загрязнения, распространяющуюся на высоту до 150 м и более. Эта зона охватывает не только промышленные районы, но и центральные, а также южные жилые кварталы. Именно выбросы промышленных предприятий определяют общий уровень загрязнения воздуха в городских агломерациях. Самая высокая степень загрязнения наблюдается в периоды неблагоприятных метеорологических условий (приземные инверсии,

штиль), когда вертикальное рассеивание блокируется и вредные примеси накапливаются в приземном слое вблизи крупных предприятий [41].

По данным Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, размещенным на официальном сайте, были составлены диаграммы общих объемов выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) и их структуры от стационарных источников в г. Челябинске за 2020-2024 гг. Эти данные представлены на рисунках 11-16 [14].



Рисунок 11 – Структура выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников в г. Челябинске (2020 г.)



Рисунок 12 – Структура выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников в г. Челябинске (2021 г.)



Рисунок 13 – Структура выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников в г. Челябинске (2022 г.)



Рисунок 14 – Структура выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников в г. Челябинске (2023 г.)



Рисунок 15 – Структура выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников в г. Челябинске (2024 г.)

В 2020 году объемы выбросов ЗВ от стационарных источников в атмосферный воздух в г. Челябинске составляли 121,4 тыс. тонн, в 2024 – 92,7 тыс. тонн.

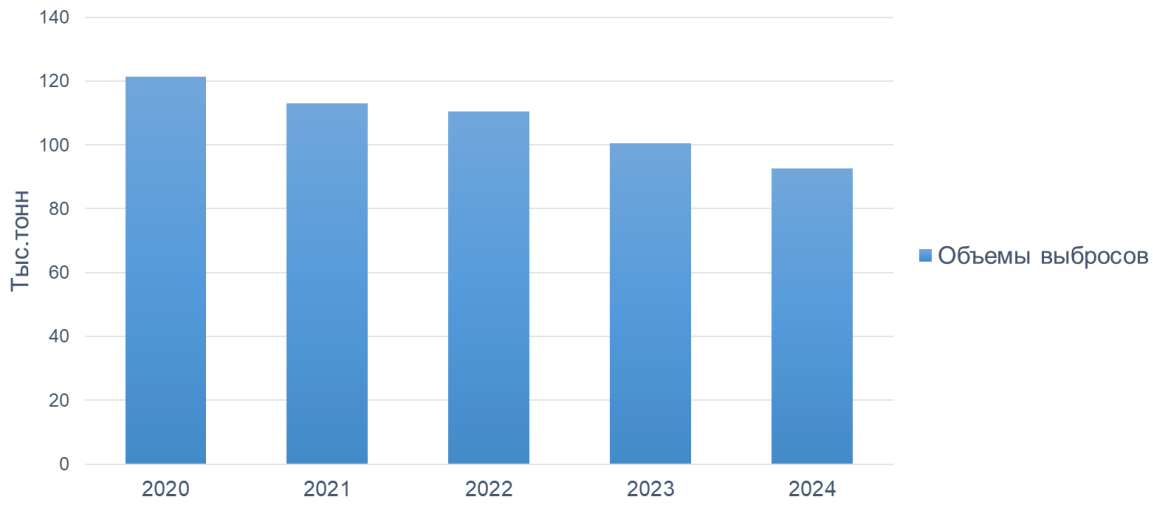


Рисунок 16 – Объемы выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников в г. Челябинске за 2020-2024 гг.

Анализ диаграмм (рисунок 16) показывает, что за период 2020-2024 гг. объемы выбросов от стационарных источников уменьшились в 1,3 раза. Снижение выбросов от стационарных источников можно связать с введением в 2019 году федерального проекта «Чистый воздух», который включает модернизацию промышленности и мониторинг качества атмосферного воздуха.

На фоне общего снижения объемов выбросов изменилась их структура (рисунки 11-15). Увеличилась доля летучих органических соединений (с 2, 38 % в 2020 г. до 3,34% в 2024) и углеводородов (с 0,33% до 0,65%) за счет уменьшения доли диоксида серы (с 7,40% до 6,80%) и твердых веществ (с 14,80% до 13,59% в среднем, при колебании до 13% в 2022-2023 гг.). Рост доли ЛОС и углеводородов при снижении доли диоксида серы и твёрдых веществ объясняются опережающим внедрением эффективных методов очистки от серы и пыли по сравнению с менее совершенным контролем летучих органических соединений и углеводородов. На протяжении 5 лет основным загрязнителем остается оксид углерода (CO, доля которого составляет около

58%), что характерно для предприятий с неполным сгоранием топлива (металлургия, ТЭЦ, литейные производства и др.).

2. Передвижные источники загрязнения

Передвижные источники охватывают автотранспорт, железнодорожный транспорт, авиацию и водный транспорт. В Челябинске, как и в большинстве крупных городов, наибольшая доля в этой категории источников загрязнения принадлежит автотранспорту.

Автомобильный транспорт является вторым по важности источником загрязнения атмосферного воздуха в Челябинске. Автомобили сжигают топливо из нефтепродуктов, и в атмосферу попадают вредные компоненты отработавших газов. Загрязняющими веществами являются: оксид углерода, диоксид азота, летучие органические соединения (бенз(а)пирен, формальдегид), метан, аммиак. Заторы на дорогах, низкое качество топлива и изношенность автопарка усугубляют негативное воздействие поллютантов.

По данным Федеральной службы по надзору в сфере природопользования объемы выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от автомобильного транспорта в Челябинской области в 2020 году составил 105,55 тыс. тонн, а в 2024 - 114,92 тыс. тонн (рисунок 17) [14].

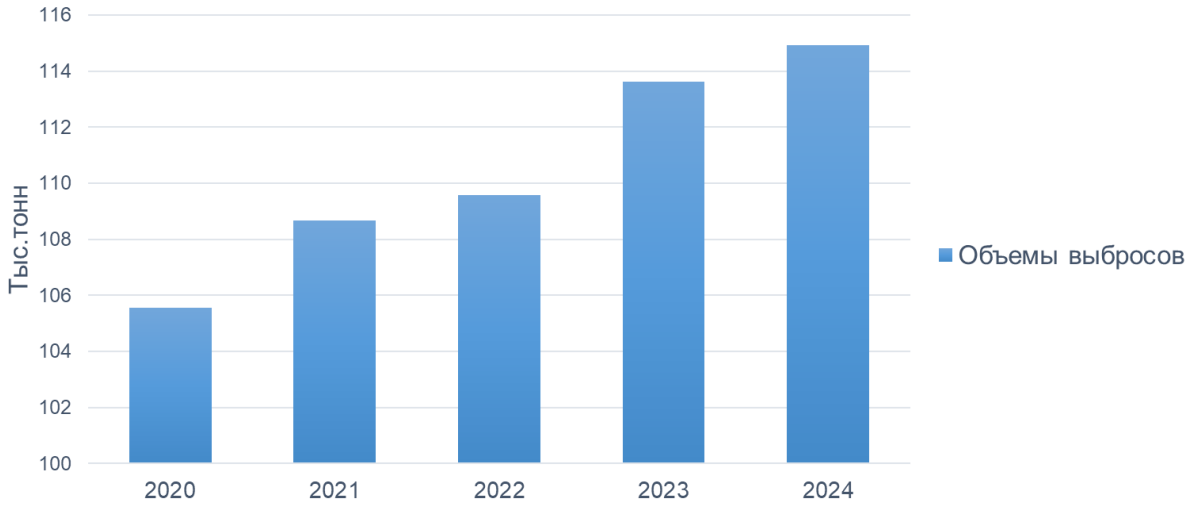


Рисунок 17 – Объемы выбросов загрязняющих веществ от автомобильного транспорта в Челябинской области за 2020-2024 гг.

Таким образом, объемы выбросов загрязняющих веществ от автомобильного транспорта за 5 лет увеличились в 1,09 раза. Вероятнее всего, это связано с увеличением количества автомобильного транспорта в Челябинской области.

2.3. Неблагоприятные метеорологические условия г. Челябинска и факторы их формирования

Основными причинами формирования дней с НМУ в г. Челябинске являются:

1) Метеорологические факторы (слабые ветры и ветры неблагоприятного направления, инверсии температуры);

2) Объемы выбросов поллютантов (были рассмотрены в п. 2.2.).

Изучение метеорологических причин формирования НМУ проводилось за период 2020-2024 гг. В качестве исходных данных в работе использовались информационные сообщения об объявлениях дней с НМУ в г. Челябинске (с указанием их причин: слабый ветер и ветер неблагоприятного направления, инверсия температуры) [13], а также архив погоды метеостанции «Шершни» [5]. По данным о направлении ветра с сайта rp.5 построены розы ветров и определены преобладающие направления (приложение 1).

Результаты исследования представлены в приложениях 2-21, таблице 2.

Таблица 2 – Количество дней с НМУ в г. Челябинске за 2020-2024 гг. и факторы их формирования

год	зима*		весна		лето		осень	
	всего дней с НМУ	неблаг. ветра	всего дней с НМУ	неблаг. ветра	всего дней с НМУ	неблаг. ветра	всего дней с НМУ	неблаг. ветра
2020	44	44	55	55	74	73	57	46
2021	54	52	41	36	79	77	38	30
2022	60	59	39	39	62	62	48	48
2023	46	40	40	40	45	43	45	38
2024	39	34	33	31	33	33	47	41
Итого	243	229	208	201	293	288	235	203

*- засчитывалось кол-во дней декабрь предыдущего года, январь-февраль текущего

В таблице 2 указаны сведения о количестве дней с неблагоприятными метеорологическими условиями по различным сезонам года (зима, весна, лето, осень) за 2020-2024 гг., а также количество дней с неблагоприятным направлением ветра (в нашем случае это преимущественно ветры южных и юго-восточных румбов, а также дни со штилями).

Суммарные итоговые значения за пять лет составляют:

- Зима: 243 дня с НМУ, из них 229 с ветрами неблагоприятного направления;
- Весна: 208 дней с НМУ, из них 201 с ветрами неблагоприятного направления;
- Лето: 293 дня с НМУ, из них 288 с ветрами неблагоприятного направления;
- Осень: 235 дней с НМУ, из них 203 с ветрами неблагоприятного направления.

Всего за 2020-2024 гг. было зафиксировано 979 дней с НМУ. Результаты анализа данных за различные сезоны года показали, что основной причиной формирования дней с НМУ в г. Челябинске являются: слабые ветры неблагоприятного направления (921 день из 979) и инверсии в свободной атмосфере. Для теплого сезона (май-октябрь) определенную роль играют ночные инверсии, характерные для антициклонального режима погоды (рисунок 18).

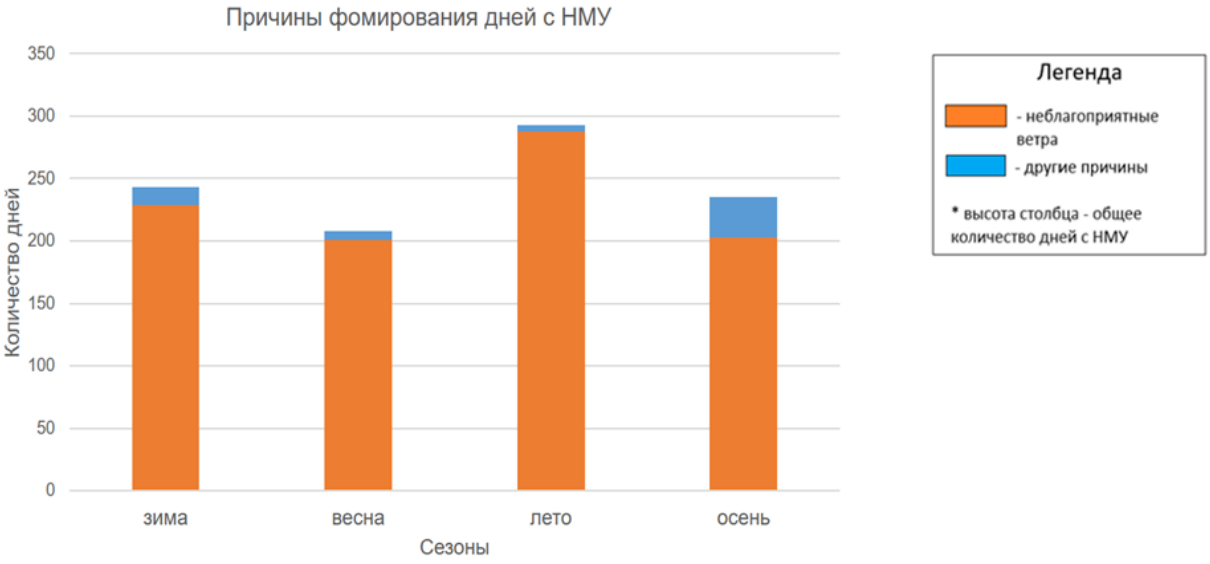


Рисунок 18 – Причины формирования дней с НМУ за 2020-2024 гг. в г. Челябинске

По результатам анализа построен график продолжительности дней с НМУ по годам, на котором наблюдается снижение их количества (рисунок 19). Если в 2020 году было отмечено 230 дней, то к 2024 году их число сократилось до 152. Это может свидетельствовать о постепенном улучшении метеорологической ситуации в городе.

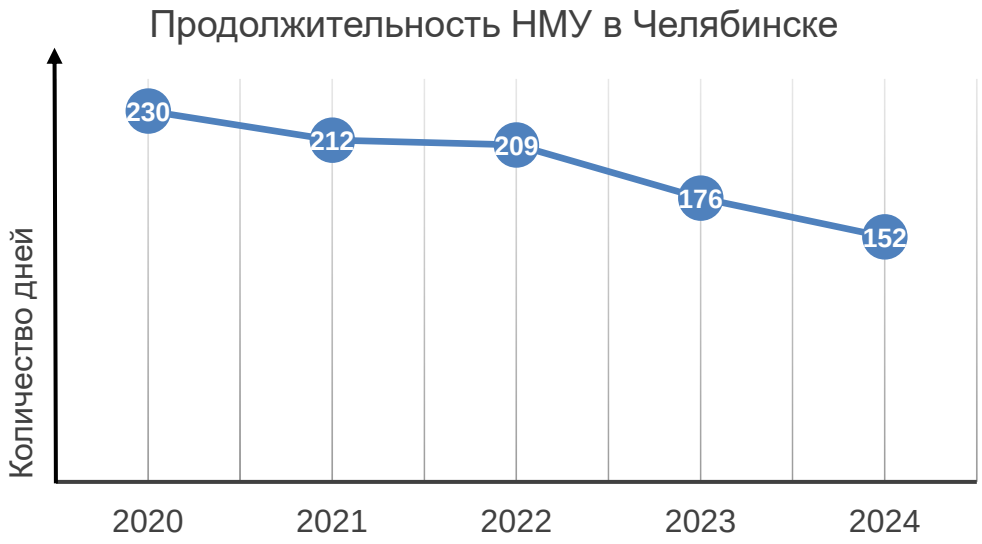


Рисунок 19 – Продолжительность дней с НМУ в Челябинске

Таким образом, неблагоприятное направление ветра (слабые ветры, дующие со стороны промышленных зон в сторону жилых районов - южные и

юго-восточные) – ключевой метеорологический фактор, определяющий возникновение НМУ в Челябинске за период 2020-2024 гг.

Анализ данных по продолжительности дней НМУ по сезонам года показал отсутствие сезонной зависимости в формировании неблагоприятных условий в атмосфере:

Оставшиеся дни с НМУ, не связанные напрямую с неблагоприятными ветрами, объясняются антициклональным режимом погоды, характерным для Челябинска. Антициклоны обуславливают устойчивую стратификацию атмосферы, слабые ветры (часто штиль), отсутствие осадков и вертикального перемешивания, что создает благоприятные условия для накопления загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы. В таких условиях даже небольшие выбросы могут приводить к длительным периодам НМУ.

Проявление антициклонов в г. Челябинске, как фактора формирования дней с НМУ за 2020-2024 гг. наиболее заметен в осенний период, в котором всего было 235 дней с НМУ, из них - 203 дня с неблагоприятными ветрами. Оставшиеся 32 дня связаны с антициклональными явлениями.

Таким образом, наблюдаемые различия в суммарных показателях обусловлены не сезонными причинами, а случайной межгодовой изменчивостью синоптических условий. Периоды с НМУ в г. Челябинске могут возникать с разной вероятностью в любой сезон.

Выводы по второй главе

В рамках этой главы нами изучено состояние атмосферного воздуха г. Челябинска. Исследование охватило анализ главных источников загрязнения, изменение объемов их выбросов за 2020-2024 гг., а также факторы формирования дней с неблагоприятными метеорологическими условиями в г. Челябинске.

Анализ показал, что основной вклад в загрязнение атмосферы г. Челябинска вносят промышленные предприятия, среди которых «Челябинский металлургический комбинат», АО «Челябинский цинковый

завод», ПАО «Форвард Энерго» (городские ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, ТЭЦ-3, ТЭЦ-4) и автомобильный транспорт. Они выбрасывают вредные вещества, загрязняющие атмосферу: банз(а)пирен, формальдегид, взвешенные частицы и др.

Изучив объемы выбросов от стационарных и передвижных источников г. Челябинска за 2020-2024 гг., мы пришли к выводу о том, что объемы выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников снизились в 1,3 раза, что связано с введением в 2019 году федерального проекта «Чистый воздух». Объемы выбросов ЗВ от автомобильного транспорта за 5 лет увеличились в 1,1 раза, что, вероятнее всего, связано с увеличением количества автомобильного транспорта на территории Челябинской области.

Значительное влияние на накопление ЗВ в атмосферном воздухе городских агломераций оказывают неблагоприятные метеорологические условия. По результатам анализа всего за 2020-2024 гг. зафиксировано 979 дней с НМУ и построен график продолжительности дней с НМУ по годам, на котором наблюдается снижение их количества. Изучив метеорологические параметры формирования дней с НМУ в г. Челябинске, мы пришли к выводу, что ключевым метеорологическим фактором, определяющим возникновение НМУ в Челябинске за период 2020-2024 гг., является неблагоприятное направление ветра. Из 979 дней с НМУ 921 день сформировался под влиянием неблагоприятного направления ветра.

Периоды с НМУ в г. Челябинске могут возникать с разной вероятностью в любой сезон года.

Незначительную роль в формировании дней НМУ играет антициклональный режим погоды, обусловливающий возникновение температурных инверсий.

ГЛАВА 3. ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В Г. ЧЕЛЯБИНСКЕ

Качество атмосферного воздуха является одним из ключевых показателей экологического благополучия города и здоровья его населения. Челябинск, традиционно относящийся к числу крупнейших промышленных центров России с высокой антропогенной нагрузкой на окружающую среду, на протяжении десятилетий сталкивался с проблемой загрязнения воздуха, обусловленной концентрацией промышленных предприятий (металлургия, энергетика) и большим количеством автотранспорта. Глава посвящена систематизации и анализу путей улучшения качества атмосферного воздуха в Челябинске.

3.1. Нормативно-правовые и стратегические основы улучшения качества атмосферного воздуха

Решение проблемы загрязнения атмосферного воздуха в промышленных городах России осуществляется в рамках комплекса нормативно-правовых и стратегических документов федерального и регионального уровней. Ключевым механизмом, направленным на снижение промышленных выбросов и улучшение качества воздуха, стал федеральный проект «Чистый воздух», который первоначально реализовывался в рамках национального проекта «Экология» (2019–2024 гг.), а с 2025 года продолжает функционировать в составе нового национального проекта «Экологическое благополучие».

На первом этапе в федеральный проект «Чистый воздух» вошли 12 городов — промышленных центров с высоким и очень высоким уровнем загрязнения воздуха, в числе которых оказались Магнитогорск и Челябинск. Ключевая задача проекта — к 2030 году вдвое сократить выбросы во всех этих городах относительно уровня 2017 года [4]. Сроки реализации проекта были продлены: в августе 2024 года председатель правительства РФ подписал постановление о продлении срока действия проекта с 31 декабря 2030 года до

конца 2036 года. К концу 2026 года 12 городам-участникам предстояло снизить общий объем выбросов загрязняющих веществ не менее чем на 20 процентов. До конца 2030 года 29 новых городов-участников должны снизить объемы выбросов не менее чем на 20 процентов относительно показателей 2020 года, а к концу 2036 года — сократить вдвое [3]. Важнейшим инструментом достижения поставленных целей является механизм квотирования выбросов. Суть эксперимента, запущенного в 2022 году, заключается в установлении для предприятий жестких лимитов на загрязнение воздуха, которых необходимо достичь к установленному сроку [32].

Процедура квотирования включает пять последовательных этапов:

1) сводные расчеты загрязнения атмосферного воздуха;
2) оценка рисков для здоровья человека;
3) определение перечня приоритетных загрязняющих веществ;
4) формирование списка объектов для квотирования;
5) установление целевых показателей снижения выбросов [31].

По Указу Президента РФ к концу 2026 года снижение опасных выбросов должно составить не менее 20% от уровня 2017 года. Эксперимент по квотированию выбросов продлится до 31 декабря 2026 года, после чего регионы, возможно, получат право самостоятельно устанавливать целевые показатели снижения загрязнений для любых городов и территорий, распространяя накопленный опыт по квотированию на всю страну [44].

Другим важным направлением государственной экологической политики является внедрение наилучших доступных технологий (НДТ). Эти технологии позволяют предприятиям использовать наиболее эффективные и передовые методы и практики, при этом обеспечивая экономически и технически обоснованные условия [28]. Примеры внедрения НДТ в промышленности включают реконструкцию газопылеулавливающих систем на агломерационных фабриках, модернизацию электрофильтров, очищающих дымовые газы от золы, и перевод конечного охлаждения коксового газа в закрытый цикл. Эти меры помогают снизить выбросы твердых и вредных

веществ в атмосферу, что в свою очередь улучшает качество воздуха в городах [38].

Налогово-экономический механизм стимулирования внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) в промышленности является важным стимулом. При внедрении НДТ предприятия освобождаются от платы за выбросы в пределах установленных нормативов, тогда как для компаний, не перешедших на комплексные экологические разрешения, платежи постепенно увеличиваются (в 2, 4 и 8 раз). Технологические показатели наилучших доступных технологий (НДТ) определены для производства меди, цемента, извести, стекла, угля, для металлургической отрасли, ряда отраслей химической промышленности, переработки нефти, производства текстильной и кожаной продукции, и иным видам деятельности [11].

На федеральном уровне также ведется работа по совершенствованию системы экологического мониторинга. За последние годы получили развитие автоматизированные системы контроля качества атмосферного воздуха, позволяющие в режиме реального времени отслеживать концентрацию загрязняющих веществ. Современные станции обеспечивают автоматический круглосуточный контроль, измеряя концентрацию диоксида серы, оксида углерода, диоксида и оксида азота, аммиака, сероводорода, формальдегида и мелкодисперсных частиц пыли [8].

Дополнительным резервом снижения выбросов является обновление транспортной системы:

1) Развитие общественного транспорта. Расширение и улучшение качества городского общественного транспорта, внедрение электробусов и других экологичных видов общественного транспорта может стимулировать переход населения с личных автомобилей на общественный транспорт.

2) Интеллектуальные системы управления трафиком. Внедрение умных светофоров, адаптивных сигнальных систем, систем мониторинга загруженности дорог и анализа данных в реальном времени позволяет оптимизировать потоки транспорта, снижать заторы и, как следствие,

уменьшать выбросы. Например, адаптивные системы могут регулировать время переключения светофоров для ускорения потока транспорта.

3) Модернизация автопарка. Стимулирование перехода на экологичные автомобили — электромобили, а также транспортные средства с современными системами очистки выхлопа (каталитические нейтрализаторы, системы с адекватной фильтрацией).

4) Развитие инфраструктуры для велосипедистов и пешеходов. Создание безопасных дорожек и зон для пешеходов способствует уменьшению зависимости от автомобилей, что снижает транспортную нагрузку [23].

Важную роль в защите атмосферного воздуха играют благоустройство санитарно-защитных зон вокруг промышленных предприятий и массовое озеленение городских территорий. Вблизи предприятий с большим количеством выбросов вредных веществ санитарно-защитная зона формируется в виде аэродинамической системы из зелёных защитных полос и открытых пространств между ними. Полосы целесообразно размещать под углом 80-90° к основному направлению ветра. При этом зона проветривается по многочисленным каналам в горизонтальном направлении. Завихрение воздуха за полосами способствует образованию восходящих потоков и рассеиванию выбросов в наиболее высоких слоях атмосферы.

Растения обогащают воздух кислородом. На деревьях и кустах оседает до 72% взвешенных в воздухе частиц пыли и до 60% диоксида серы. Поэтому в городских парках, скверах, садах пыли в десятки раз меньше, чем на открытых улицах и площадях.

Многие виды деревьев и кустарников выделяют фитонциды, регулируют микроклимат города, поглощают и снижают городской шум.

В крупных городах также практикуется создание ветрозащитных лесополос и придорожных зеленых экранов, снижающих распространение загрязнений от автомагистралей к жилой застройке [26].

3.2. Реализация экологических мероприятий в Челябинске

1. Модернизация промышленных предприятий

Загрязненный воздух – одна из главных проблем Челябинска. Ее решением занимается федеральный проект «Чистый воздух». Чтобы сократить объем опасных выбросов, на промышленных предприятиях внедряют современные технологии производства. В городе ликвидируют свалки, модернизируют котельные и запускают экологический транспорт [40].

В рамках федерального проекта «Чистый воздух» в г. Челябинске в 2022 году актуализированы комплексные планы мероприятий по снижению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, в состав которых вошли 9 предприятий (65 мероприятий). В рамках реализации комплексных планов ПАО «ЧМК» в прокатных цехах выполнен комплекс мероприятий по снижению потребления газа топливо-потребляющими агрегатами (печами), проведена замена рекуператоров и горелок, модернизированы системы автоматического регулирования для поддержания оптимального соотношения газ/воздух, выведены из работы нагревательные колодцы, была проведена замена и реконструкция технологического и газоочистного оборудования, выведено из эксплуатации устаревшее оборудование, изменен состав используемого газа и снижено его потребление, выведена из эксплуатации коксовая батарея. По итогам реализации проекта валовые выбросы ЧМК к концу 2025 года снизились на 32,2% (65,7 тыс. тонн) к уровню 2017 года.

В 2023 году Челябинская ТЭЦ-2 перешла на газ и ушла от сжигания угля в качестве основного и резервного вида топлива, что обеспечило снижение выбросов на 2100 т по сравнению с 2017 годом.

В 2024 году на Челябинском цинковом заводе завершено внедрение доочистки отходящих газов печей КС-1,2,3,4,5 обжигового цеха при их пуске и остановке.

В 2025 году на АО «Челябинский трубопрокатный завод» завершена ликвидация складов угля и песка в ЦСХ. На МУП «Производственное

объединение водоснабжения и водоотведения» завершились I и IV этап реконструкции очистных сооружений города Челябинска.

Ключевые технологические направления модернизации, реализуемые на предприятиях Челябинска, включают:

- Внедрение современных технологий очистки газовых выбросов. Наиболее распространены механическая очистка (циклоны, рукавные и электростатические фильтры), абсорбционная очистка (поглощение диоксида серы, оксидов азота), адсорбционная очистка (удаление летучих органических соединений), каталитическая очистка (превращение вредных веществ в менее опасные). Перспективными для Челябинска являются комбинированные методы, биологическая, плазменная и мембранная очистка.
- Модернизация технологических процессов. Внедрение замкнутых циклов водоснабжения, энергосберегающих, малоотходных и безотходных технологий, автоматизация и цифровизация производства.
- Повышение энергоэффективности. Модернизация оборудования, оптимизация производственных процессов, системы рекуперации тепла, улучшение теплоизоляции зданий, внедрение систем энергоменеджмента.
- Развитие «зеленой» химии. Замена опасных растворителей на воду, использование катализаторов для снижения выбросов оксидов азота, внедрение биоразлагаемых полимеров. Пример для Челябинска: внедрение электрохимического травления металла вместо традиционных кислотных методов на ЧМК позволит сократить образование токсичных отходов и снизить расход воды [22].

2. Развитие устойчивой транспортной системы

Транспортный сектор в Челябинске вносит существенный вклад в загрязнение атмосферы. Автомобильные выбросы содержат твердые частицы (PM10 и PM2.5), оксиды азота, монооксид углерода, летучие органические соединения. Для улучшения качества воздуха необходимо развивать устойчивую транспортную систему, снижающую зависимость от личного транспорта.

Модернизация транспортной инфраструктуры в г. Челябинске включает обновление подвижного состава общественного транспорта и контактной сети электротранспорта, перевод транспорта на экологичные виды топлива (например, газомоторное топливо).

Реконструкция и развитие троллейбусной системы в Челябинске проходит в рамках концессионного соглашения, подписанного компанией «Синара–Городские Транспортные Решения Челябинск» (входит в холдинг «Синара-Транспортные Машины», СТМ) и Правительством Челябинской области. Соглашение заключено на 15 лет и предполагает не только модернизацию объектов инфраструктуры, но и последующее обслуживание и эксплуатацию троллейбусного парка, организацию пассажирских перевозок. В рамках проекта на 90% выполнено обновление контактной троллейбусной сети, идет модернизация тяговых подстанции. Построено и открыто новое депо №1 на улице Артиллерийской для обслуживания 59 единиц подвижного состава. На площадке депо №2 на Свердловском тракте, рассчитанного на 128 машин, проведены необходимые демонтажные работы, завершено устройство фундаментов и ведется реконструкция главного производственного корпуса.

Производство троллейбусов собственной конструкторской разработки холдинга СТМ организовано на Челябинском заводе городского электрического транспорта, запущенном в марте 2023 года. С 1 сентября 2023 года первые 10 троллейбусов «СИНАРА-6254» вышли на городской магистральный маршрут №19, а затем и на другие линии. Только за первый год эксплуатации новых машин пассажиропоток увеличился на 80% по сравнению с тем периодом, когда на линии работал старый подвижной состав.

В настоящее время новый подвижной состав «СИНАРА-6254» в количестве 50 единиц работает на четырех троллейбусных маршрутах: № 10, 12, 14, 19 [29].

Кроме того, в Челябинске продолжают запускать новые автобусы на газомоторном топливе, взамен старого общественного транспорта на бензине,

что вносит свой вклад в улучшение качества воздуха (например, в 2021 г. запустили 157 новых автобусов на газомоторном топливе, в 2025 – 24) [6].

3. Экологический мониторинг

В Челябинске продолжается развитие системы наблюдения за качеством атмосферного воздуха. Мониторинг качества атмосферного воздуха в Челябинске осуществляется через комплексную систему, включающую стационарные посты наблюдения, интегрированные информационные системы и мобильные приложения. Основная ответственность за организацию мониторинга возложена на ОГКУ «Центр экологического мониторинга Челябинской области» (Министерство экологии Челябинской области) [1].

В рамках федерального проекта «Чистый воздух» в 2021 г. в г. Челябинске были завершены работы по созданию территориального информационно-аналитического центра сбора и обработки данных с постов государственной, территориальной и локальных сетей наблюдения. С помощью полученной информации появилась возможность выявлять потенциальные загрязнители атмосферы для оперативного воздействия на них.

В 2022 г. были введены в эксплуатацию стационарный пост и передвижная лаборатория контроля качества атмосферного воздуха в г. Челябинске. Стационарный пост установили перед домами №35, 37 и 39 по улице Южный бульвар в Ленинском районе. Он способен измерять концентрацию загрязняющих веществ каждые 20 минут круглосуточно. Для стабильной работы предусмотрена система жизнеобеспечения [30].

3.3. Экологическое просвещение населения как фактор улучшения качества воздуха

Одним из ключевых элементов улучшения качества атмосферного воздуха в Челябинске выступает повышение уровня экологической грамотности населения. Граждане, обладающие необходимыми знаниями и чувством ответственности, способны делать обдуманный выбор,

направленный на уменьшение загрязнения, и активно включаться в решение экологических задач. Без участия жителей даже самая современная модернизация заводов не даст полного эффекта – личный автотранспорт, сжигание мусора и незнание правил поведения в периоды неблагоприятных метеоусловий (НМУ) остаются существенными источниками вредных выбросов.

В Челябинске экологическое просвещение реализуется через различные каналы — образовательные программы, общественные инициативы, проекты и мероприятия [22].

1. Экологическое образование в школах Челябинской области

Современное экологическое образование – это не только комплекс естественнонаучных знаний и умений, но и критерий культуры и развития человека. Главная цель экологического образования - воспитание экологической культуры подрастающего поколения.

В школах Челябинской области задействованы все учебные дисциплины средней школы (биология, химия, физика, география, литература, история, физкультура и др.), обогащающие школьников конкретными знаниями об окружающей среде, о природе Земли, потребностях человека и ценности жизни. Областной базисный учебный план составлен и обеспечен таким образом, что от 10 % до 15 % содержания образования каждого предмета должны отражать национально-региональный компонент государственного образовательного стандарта.

Развитие экологического образования в регионе реализуется в рамках:

– областного базисного учебного плана с выделением учебного предмета «Экология» в основной и старшей школе;

– предпрофильной подготовки обучающихся в основной школе и профильного обучения на ступени старшей школы;

– интегрированного обучения через максимальную экологизацию содержания отдельных школьных предметов;

– факультативных и элективных курсов;

– дополнительного образования.

В классах химико-биологического, биолого-географического, физико-математического и агротехнического профиля, открытых за последние три года, содержание образования имеет ярко выраженный экологический характер. В данных образовательных учреждениях разрабатываются и реализуются элективные курсы по экологии («Здоровье человека и окружающая среда», «Окружающая среда и человек», «Экологическая азбука», «Агроэкология», «Основы радиационной безопасности» и т.д.) [25].

2. Массовые просветительские мероприятия и акции

Важную роль в формировании экологической культуры населения играют экологические диктанты, форумы и общественные акции. В 2024 году было проведено около 100 экологических мероприятий (в 2023 году – 59), среди которых самыми массовыми стали Всероссийский экологический диктант, субботники по очистке берегов рек и озер Челябинской области от мусора в рамках всероссийской акции «Вода России», проект «Чистые игры», конкурс «Новогоднее превращение», акция «Синичка», конкурс народного экотворчества «Авоська 74». Общее количество участников превысило 500 тыс. человек [17].

Важнейшим для региона событием в 2024 году стало проведение второго Всероссийского детского экологического форума, в двух этапах которого приняло участие 3 500 школьников из всех 89 регионов страны (в 2023 г. было 2 500 участников из 18 регионов). На форуме были представлены проекты, в том числе посвященные мониторингу атмосферного воздуха и снижению промышленных выбросов [9].

Помимо этого, Челябинск активно участвует в специализированных акциях, направленных на улучшение качества атмосферного воздуха. В 2024 году он занял первое место среди 40 городов-участников во всероссийской акции «Выбираю чистый воздух». Жители прошли в совокупности более 14 млн километров, совершив свыше 20 млрд чистых шагов, что позволило

сэкономить 1 млн литров топлива и предотвратить выброс почти 3 тыс. тонн загрязняющих веществ в атмосферный воздух [2].

По данным опроса Центра общественного мониторинга Челябинской области (декабрь 2025 г., 1600 респондентов из 17 городов и сел), 72,9% жителей высоко оценивают результат нацпроектов, а 43,7% назвали «Экологическое благополучие» особенно значимым. Это свидетельствует о том, что системное экологическое просвещение и открытость экологической информации формируют доверие населения и готовность поддерживать природоохранные меры [34].

Выводы по третьей главе

Исходя из проведённого в третьей главе анализа, мы можем сделать следующие выводы о путях улучшения качества атмосферного воздуха в Челябинске. Ключевую роль здесь играет системная нормативно-правовая база, прежде всего федеральный проект «Чистый воздух» и механизм квотирования выбросов. В Челябинске этот инструмент уже демонстрирует значимые результаты: например, на Челябинском металлургическом комбинате к концу 2025 года удалось снизить валовые выбросы на 32,2% относительно уровня 2017 года. Важен и экономический стимул в виде поэтапного повышения платы за выбросы для предприятий, не переходящих на наилучшие доступные технологии.

Конкретные результаты даёт и модернизация промышленных предприятий. В качестве наиболее показательных примеров выделили перевод Челябинской ТЭЦ-2 с угля на газ в 2023 году, что сократило выбросы на 2100 тонн, а также внедрение систем доочистки на Челябинском цинковом заводе и вывод из эксплуатации устаревших мощностей (коксовая батарея на ЧМК).

Без развития устойчивой транспортной системы решить проблему загрязнения воздуха было бы невозможно. В Челябинске успешно обновляется троллейбусный парк: на линию вышли 50 современных троллейбусов «Синара-6254», запускаются сотни автобусов на газомоторном топливе. Это снижает долю выхлопов от личного автотранспорта. Кроме того, мы пришли к выводу, что объективный экологический мониторинг – обязательное условие эффективного управления качеством воздуха. В городе создана сеть постов, включая стационарный пост в Ленинском районе с круглосуточными замерами каждые 20 минут, что позволяет оперативно оценивать динамику загрязнения.

Важнейшим, хотя и менее очевидным фактором является экологическое просвещение населения. Как показали опросы, 72,9% жителей высоко оценивают результаты нацпроектов, а массовые акции («Выбираю чистый

воздух», экологические диктанты) вовлекают сотни тысяч человек. Без понимания горожанами правил поведения в периоды неблагоприятных метеоусловий и отказа от сжигания мусора даже самая современная очистка на заводах не даст полного эффекта.

Таким образом, системное сочетание четырёх направлений – совершенствование нормативной базы и квотирования, технологическое перевооружение промышленности, переход на экологичный общественный транспорт и активное экопросвещение – позволяет Челябинску последовательно снижать уровень загрязнения атмосферного воздуха и приближаться к целевым показателям 2036 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была достигнута поставленная цель – изучено влияние неблагоприятных метеорологических условий на качество атмосферного воздуха городских агломераций на примере г. Челябинска, а также рассмотрены возможные пути его улучшения. В ходе выполнения работы выявлено что, при сокращении выбросов от стационарных источников в 1,3 раза ключевым метеорологическим фактором ухудшения качества воздуха в дни НМУ остаются слабые ветры южных направлений (921 день из 979), а вклад антициклонального режима незначителен. Основной вклад в загрязнение атмосферы вносит автотранспорт. Его выбросы превысили промышленные на 22,2 тыс. тонн. Для дальнейшего улучшения экологической обстановки необходимо не только продолжать модернизацию заводов по наилучшим доступным технологиям, но и ужесточать уже применяемы меры по снижению автомобильных выбросов – расширение сети общественного транспорта, стимулирование перехода на газомоторное топливо. Комплексная реализация мер позволит снизить риски для здоровья населения и повысить качество атмосферного воздуха в Челябинске.

В результате исследования получены следующие результаты:

1) Анализ литературных источников показал, что загрязнение атмосферного воздуха обусловлено деятельностью человека и включает выбросы от промышленных предприятий и автотранспорта. Определенную роль в формировании качества атмосферного воздуха играют метеорологические условия, выполняющие ключевую роль в процессах рассеивания или накопления загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы.

2) Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха г. Челябинска являются стационарные (промышленные предприятия, ТЭЦ) и передвижные источники, прежде всего автомобильный транспорт. За период

2020–2024 годов объёмы выбросов от стационарных источников снизились в 1,3 раза (с 121,4 до 92,7 тыс. тонн). Выбросы ЗВ от автотранспорта увеличились в 1,09 раза (до 114,92 тыс. тонн) вследствие увеличения количества автомобилей на территории Челябинской области.

Основным загрязнителем от стационарных источников загрязнения является оксид углерода, доля которого составляет около 58%. Отмечен рост доли летучих органических соединений и углеводородов при снижении доли диоксида серы и твёрдых веществ, что объясняется опережающим внедрением эффективных методов очистки от серы и пыли по сравнению с менее совершенным контролем летучих органических соединений и углеводородов.

3) В период 2020-2024 гг. наблюдалась устойчивая тенденция к снижению продолжительности дней с НМУ в Челябинске: с 230 дней в 2020 году до 152 дней в 2024 году. Ключевым метеорологическим фактором их формирования является слабый ветер неблагоприятного направления (южный и юго-восточный). За 2020–2024 гг. зафиксировано 979 дней с НМУ, из которых 921 день сопровождался ветрами южной составляющей. Периоды с НМУ в г. Челябинске могут возникать с разной вероятностью в любой сезон года. Незначительную роль в формировании дней НМУ играет антициклональный режим погоды, обусловливающий возникновение температурных инверсий.

4) На основе полученных результатов изучены следующие пути улучшения качества атмосферного воздуха в г. Челябинске: модернизация промышленных предприятий, направленная на снижение выбросов ЗВ; снижение выбросов от автотранспорта (развитие общественного транспорта, обновление парка, улучшение качества топлива); усиление мониторинга качества воздуха.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Администрация города Челябинска : официальный сайт. – URL: https://cheladmin.gov74.ru (дата обращения: 02.05.2026). – Текст : электронный.

2. Акция «Выбираю чистый воздух»: итоги 2024 года // Федеральный проект «Чистый воздух». – URL: https://mnr-air.ru (дата обращения: 02.05.2026). – Текст : электронный.

3. Амурская бассейновая природоохранная прокуратура. – 08.06.2025. – URL: https://epp.genproc.gov.ru/ru/abpp/activity/legal-education/explain/e5870569/ (дата обращения: 11.05.2026). – Текст : электронный.

4. Аникиенко, Е. Челябинск стал одним из лидеров по снижению выбросов. – 13.07.2025. – URL: https://up74.ru/articles/news/164754/#tabs-2 (дата обращения: 11.05.2026). – Текст : электронный.

5. Архив погоды в Шершнях // Rp5.ru : расписание погоды. – URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Шершнях (дата обращения: 27.02.2026). – Текст : электронный.

6. В Челябинск прибыли новые зеленые автобусы // Национальные проекты РФ. – 22.09.2021. – URL: https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/news/v-chelyabinsk-pribyli-novye-zelenye-avtobusy/ (дата обращения: 11.05.2026). – Текст : электронный.

7. Виды и источники загрязнения атмосферы // StudFiles. – URL: https://studfile.net/preview/7759577/page:12/ (дата обращения: 25.11.2025). – Текст : электронный.

8. Волкодаева, М. В. О развитии системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха / М. В. Волкодаева, А. В. Киселев // Записки Горного института. – 2017. – Т. 227. – С. 589–596. – DOI 10.25515/PMI.2017.5.589. – Текст : непосредственный.

9. Второй Всероссийский детский экологический форум в Челябинске // Официальный сайт Правительства Челябинской области. – URL: https://www.gov74.ru (дата обращения: 02.05.2026). – Текст : электронный.

10. Горичев, Ю. П. Температурные инверсии как фактор пространственной дифференциации лесных формаций на Урале и в Предуралье. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/temperaturnye-inversii-kak-faktor-prostranstvennoy-differentsiatsii-lesnyh-formatsiy-na-urale-i-v-preduralie/viewer (дата обращения: 22.03.2026). – Текст : электронный.

11. Донченко, В. Наилучшие доступные технологии (НДТ): внедрение и развитие // EcoStandard.journal. – 2022. – 25 июля. – URL: https://journal.ecostandard.ru/eco/kontekst/nailuchshie-dostupnye-tekhnologii-ndt-vnedrenie-i-razvitie/ (дата обращения: 11.05.2026). – Текст : электронный.

12. Загрязнение атмосферы городов // Studopedia. – URL: https://studopedia.ru/3_66945_zagryaznenie-atmosferi-gorodov.html (дата обращения: 15.11.2025). – Текст : электронный.

13. Информация о прогнозных периодах НМУ в городе Челябинске // Администрация города Челябинска : официальный сайт. – URL: https://cheladmin.gov74.ru/cheladmin/overview/Podvedy/ecolog/rabota/nmu/info.htm (дата обращения: 07.02.2026). – Текст : электронный.

14. Информация об охране атмосферного воздуха : офиц. стат. информация по форме № 2-ТП (воздух) / Федеральная служба по надзору в сфере природопользования. – URL: https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/air-protect/ (дата обращения: 17.04.2026). – Текст : электронный.

15. Итоги 2021 // Министерство экологии Челябинской области : официальный сайт. – URL: https://mineco.gov74.ru/mineco/activities/itogi2021.htm (дата обращения: 11.05.2026). – Текст : электронный.

16. Итоги 2025 // Министерство экологии Челябинской области : официальный сайт. – URL:

https://mineco.gov74.ru/mineco/activities/itogi2025.htm (дата обращения: 11.05.2026). – Текст : электронный.

17. Итоги экологических мероприятий 2024 года в Челябинской области // Официальный сайт Министерства экологии Челябинской области. – URL: https://mineco.gov74.ru (дата обращения: 02.05.2026). – Текст : электронный.

18. Касьяненко, А. А. Современные методы оценки рисков в экологии : учеб. пособие. – Москва : Изд-во РУДН, 2008. – 271 с. – URL: https://ekolog.org/books/20/ (дата обращения: 17.04.2026). – Текст : электронный.

19. Климат Челябинской области / ГУ «Челябинский ЦГМС». – URL: http://www.chelpogoda.ru/pages/490.php (дата обращения: 14.05.2026). – Текст : электронный.

20. Кузнецова, Е. А. Проблема загрязнения городской атмосферы фотохимическим смогом / Е. А. Кузнецова, Е. Р. Газизуллина, Н. А. Третьякова // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 10–14 дек. 2018 г. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – С. 546–549. – Текст : непосредственный.

21. Кушнир, М. А. Анализ факторов воздействия угольных электростанций на окружающую среду / М. А. Кушнир, Е. А. Федорченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 1. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-faktorov-vozdeystviya-ugolnyh-elektrostantsiy-na-okruzhayuschuyu-sredu (дата обращения: 11.05.2026). – Текст : электронный.

22. Министерство экономического развития Челябинской области : официальный сайт. Экологическое образование и просвещение. – 04.03.2020. – URL: https://mineco.gov74.ru/mineco/other/protectingthepublic/ekologicheskoeobrazovaniepros.htm (дата обращения: 11.05.2026). – Текст : электронный.

23. Национальная система развития научной, творческой и инновационной деятельности молодежи России «Интеграция» : официальный сайт. – URL: http://integraciya.org (дата обращения: 02.05.2026). – Текст : электронный.

24. Об охране атмосферного воздуха : Федеральный закон от 04.05.1999 № 96-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 1999. – № 18. – Ст. 2222. – Текст : непосредственный.

25. Областной базисный учебный план Челябинской области: официальный документ // Официальный сайт Министерства образования и науки Челябинской области. – URL: https://minobr.gov74.ru (дата обращения: 02.05.2026).

26. Остроушко, А. А. Защита атмосферы от выбросов токсичных веществ : курс лекций / А. А. Остроушко ; Уральский государственный университет им. А. М. Горького. – Екатеринбург : Уральский государственный университет, 2007. – 23 с. – URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/1378/5/1324896_lectures.pdf (дата обращения: 11.05.2026). – Текст : электронный.

27. Постникова, С. С. Оценка рационального использования природных ресурсов : учебное пособие / С. С. Постникова, С. С. Зубова ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2022. – 96 с. – ISBN 978-5-94984-849-4. – URL: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/11917/1/Postnikova_22.pdf (дата обращения: 17.04.2026). – Текст : электронный.

28. Праслов, Ю. Чистый воздух: как улучшается экология в промышленных городах // РБК. – 28.05.2024. – URL: https://www.rbc.ru/economics/28/05/2024/664f479d9a794760cbac21c2 (дата обращения: 02.05.2026). – Текст : электронный.

29. Проект «Челябинский троллейбус». – Текст : электронный // Синара – Транспортные Машины : [сайт]. – 2021. – URL:

https://sinaratm.ru/projects/proekt-chelyabinskiy-trolleybus/ (дата обращения: 11.05.2026).

30. Расширяется территориальная система наблюдений за качеством атмосферного воздуха // Официальный сайт Министерства экологии Челябинской области. – 03.11.2022. – URL: https://mineco.gov74.ru/mineco/view/news.htm?id=10990325 (дата обращения: 12.05.2026). – Текст : электронный.

31. Регионы получат право квотировать выбросы загрязнений // ИНФРАГРИН. – 11.05.2026. – URL: https://infragreen.ru/regional-emission-quota-right/ (дата обращения: 08.05.2026). – Текст : электронный.

32. Росприроднадзор. В городах России идет масштабный эксперимент по квотированию выбросов. – 03.11.2025. – URL: https://rpn.gov.ru/press/news/v_gorodakh_rossii_idet_masshtabnyy_eksperiment_po_kvotirovaniyu_vybrosov/ (дата обращения: 08.05.2026). – Текст : электронный.

33. Селегей, Т. С. Формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах Сибири. – Новосибирск : Наука, 2005. – 348 с. – Текст : непосредственный.

34. Семья, экология и туризм: какие нацпроекты южноуральцы считают самыми важными. – URL: https://tourism.gov74.ru/tourism/view/news.htm?id=11719726 (дата обращения: 11.05.2026). – Текст : электронный.

35. Сидоров, В. В. Метеорология и климатология. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 146 с. – Текст : непосредственный.

36. Стрельников, В. В. Учение об атмосфере : учеб.-метод. пособие для выполнения практ. занятий / В. В. Стрельников, Е. В. Суркова, А. Г. Сухомлинова, И. В. Хмара. – Краснодар : Изд-во КубГАУ, 2016. – 54 с. – URL: https://kubsau.ru/upload/iblock/06d/06d035afd31944bed5c77725e2594baf.pdf (дата обращения: 16.04.2026). – Текст : электронный.

37. Теоретическая часть // StudFile. – URL: https://studfile.net/preview/10087899/page:2/ (дата обращения: 17.03.2026). – Текст : электронный.

38. Федеральный проект «Чистый воздух» : официальный сайт. – URL: https://mnr-air.ru (дата обращения: 02.05.2026). – Текст : электронный.

39. Хромов, С. П. Метеорология и климатология : учебник / С. П. Хромов, М. А. 37. Петросянц. – 7-е изд. – Москва : Изд-во Моск. ун-та : Наука, 2006. – 582 с. – Текст : непосредственный.

40. Четыре города в России достигли целей проекта «Чистый воздух». – 02.03.2026. – URL: https://www.kommersant.ru/doc/8477942 (дата обращения: 07.05.2026). – Текст : электронный.

41. Экологические проблемы народонаселения // Referat.ru. – URL: https://referat.ru/referat/ekologicheskie-problemy-narodonaseleniya-676/10 (дата обращения: 06.11.2025). – Текст : электронный.

42. Экологическое образование и просвещение. – Текст : электронный // Министерство экономического развития Челябинской области : официальный сайт. – 04.03.2020. – URL: https://mineco.gov74.ru/mineco/other/protectingthepublic/ekologicheskoeobrazovaniepros.htm (дата обращения: 28.05.2026).

43. Экология Челябинска: загрязнение воздуха. – 31.05.2024. – URL: https://xn--90aifdm6al.xn--p1ai/ecology/ehkologiya-chelyabinska-zagryaznenie-vozduha (дата обращения: 05.02.2026). – Текст : электронный.

44. Ярховска, В. Меньше 50% челябинских предприятий утвердили планы по квотированию выбросов. – 04.02.2026. – URL: https://www.kommersant.ru/doc/8399976 (дата обращения: 11.05.2026). – Текст : электронный.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1



Рисунок 1 - Файл с распределением ветров по румбам в периоды НМУ по годам