



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

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

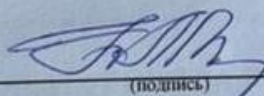
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Особенности метеорологического режима атмосферы города
Красноярска»

Исполнитель Краснова Анастасия Александровна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)
Симакина Татьяна Евгеньевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

кандидат физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

« 25 » 06 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГОРОДА КРАСНОЯРСКА.....	8
1.1. Общегеографическая характеристика	8
1.2. Рельеф	9
1.3. Гидрологический режим	11
1.4. Климатические условия.	12
2. ОПИСАНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ГОРОДА КРАСНОЯРСКА.....	14
2.1. Температурный режим	14
2.2. Атмосферное давление.....	20
2.3. Ветровой режим	21
2.4. Атмосферные осадки.....	24
2.5. Режим увлажнения	26
2.6. Атмосферные явления.....	27
3. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ ГОРОДА КРАСНОЯРСКА	32
3.1. Режим «Черного неба».	34
4. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ	37
4.1. Солнечная радиация.....	37
4.2. Температура	37
4.3. Инверсии температуры	38
4.4. Осадки.....	39
4.5. Туманы.....	40
4.6. Ветер.....	41

5. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ГОРОДА НА КАЧЕСТВО ВОЗДУХА.....	43
5.1. Анализ динамики концентрации загрязняющих веществ.....	43
5.2. Анализ зависимости изменения концентраций загрязняющих веществ от скорости ветра	45
5.3. Анализ зависимости изменения концентраций загрязняющих веществ от температуры воздуха	46
5.4. Анализ зависимости изменения концентраций загрязняющих веществ от количества температурных инверсий.....	47
5.4. Анализ зависимости изменения концентраций загрязняющих веществ от количества осадков	49
5.5. Анализ зависимости изменения концентраций загрязняющих веществ от количества туманов	51
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	55

ВВЕДЕНИЕ

По своей физической природе атмосфера является весьма подвижной средой, в которой происходят непрерывные изменения метеорологических элементов (температуры, давления, влажности, направления, скорости ветра и др.). При этом изменения одних метеорологических элементов влекут за собой изменения других. Вместе с тем характеристики некоторых метеорологических элементов зависят от широты местности, времени года и топографических условий, типа подстилающей поверхности и ряда других факторов.

Красноярск является крупнейшим городом в Сибири, расположенным в уникальном географическом положении, на пересечении двух крупных речных систем – Енисея и его притоков, в глубокой котловине, окруженной горными хребтами. Это создает особые метеорологические условия, отличающие его от других городов равнинной территории, и обуславливает необходимость детального изучения его климатического режима.

Величина вклада метеорологического режима города в формирование среднего уровня загрязнения атмосферы иногда может составлять от 30 до 50%. Неблагоприятные метеорологические условия могут создавать значительное повышение в атмосфере концентраций токсических соединений, что определяет негативные изменения в жизнедеятельности человека.

Воздух в Красноярске, где развита многоотраслевая промышленность с преобладанием теплоэнергетики, металлургии (цветной и чёрной), машиностроения, лесной, фармацевтической и химической отраслей, отличается сравнительно постоянным набором загрязняющих веществ.

Актуальность проблемы связана с выявлением особенностей метеорологического режима города необходимым для улучшения прогнозирования погоды, оценки рисков загрязнений и разработки мер по адаптации к решению экологических проблем. А также анализ свойственных данной территории неблагоприятных метеорологических условий, которые влияют на загрязнение воздуха.

Целью данной работы является изучение особенностей метеорологического режима, его пространственной и временной изменчивости, а также оценка влияния метеорологических условий на качество атмосферного воздуха в Красноярске.

Для успешной реализации целей данного научного исследования необходимо последовательное решение следующих ключевых задач:

- Провести комплексный анализ географических и климатических особенностей расположения Красноярска на основе теоретических источников.
- Изучить архивные данные метеонаблюдений с целью выявления закономерностей пространственно-временной динамики погодных условий.
- Определить перечень метеорологических параметров, оказывающих наибольшее влияние на качество атмосферного воздуха в городской среде.
- Установить взаимосвязи между метеорологическими факторами и уровнем загрязнения атмосферы Красноярска в рамках рассматриваемого временного интервала.

В данной выпускной квалификационной работе рассматривается период с 2012 по 2022 год (11 лет) по метеорологическим данным: температуры воздуха, направления и скорости ветра, атмосферного давления, влажности воздуха, осадков и атмосферных явлений для исследования их особенностей метеорологических характеристик и влияние на загрязнение атмосферы г. Красноярска.

Объектом исследования в данной работе является воздушное пространство города Красноярска.

Структура бакалаврской работы: работа состоит из введения, пяти глав, которые разделены на подглавы, заключения и списка используемых источников.

1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГОРОДА КРАСНОЯРСКА

1.1. Общегеографическая характеристика

Красноярск – крупнейший деловой, промышленный и культурный центр Восточной Сибири, столица Красноярского края, второго по площади субъекта России. Положение Красноярска на пересечении существующих и перспективных межконтинентальных трасс железнодорожного, автомобильного, воздушного и водного транспорта обуславливает возможность развития города как крупнейшего транспортного центра [1].

Город расположен в Южной Сибири, на территории Красноярского края Российской Федерации – рис 1.1. Город занимает обширную территорию в пределах крупной котловины, образованной рекой Енисей и окружающими её горными хребтами – Восточным Саяном на юге и Среднесибирским плоскогорьем на севере, востоке и западе. Город расположен на высоте от 150 до 250 метров над уровнем моря.

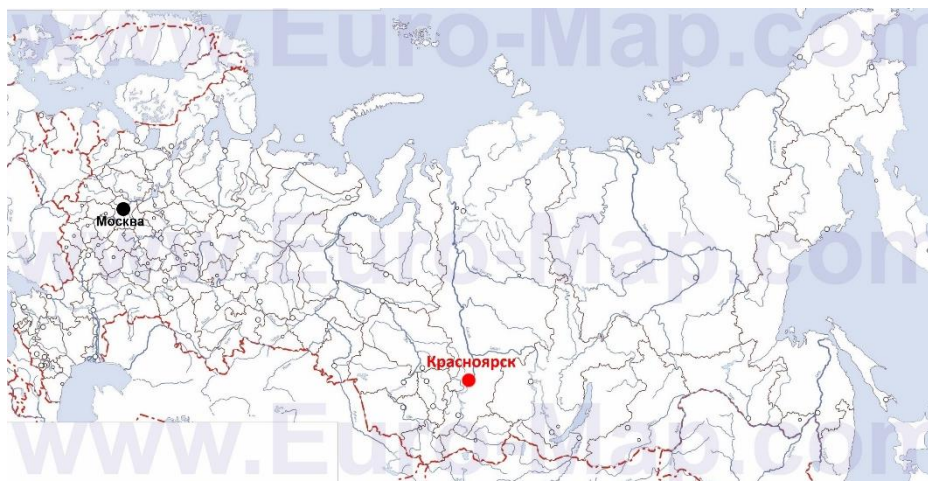


Рисунок 1.1 – Местоположение города Красноярска на карте России

Географические координаты Красноярска: 56°00' северной широты и 92°50' восточной долготы. Близость к горным хребтам и значительная протяженность города вдоль Енисея определяют существенную пространственную изменчивость метеорологических параметров.

Красноярск занимает территорию площадью 380 квадратных километров, административно разделенную на семь городских районов. Их границы закреплены соответствующими нормативными документами и отображены в городской планировочной структуре. Енисей, протекая через город, естественным образом делит его на две части - левобережную и правобережную. Основная масса жителей (более 80%) проживает в четырех левобережных районах, тогда как правый берег, где преимущественно расположены промышленные зоны, характеризуется значительно меньшей плотностью населения.

Согласно представленной схеме (рис. 1.2), территория города в административном отношении делится на семь районов: Железнодорожный, Кировский, Ленинский, Октябрьский, Свердловский, Советский и Центральный[1].

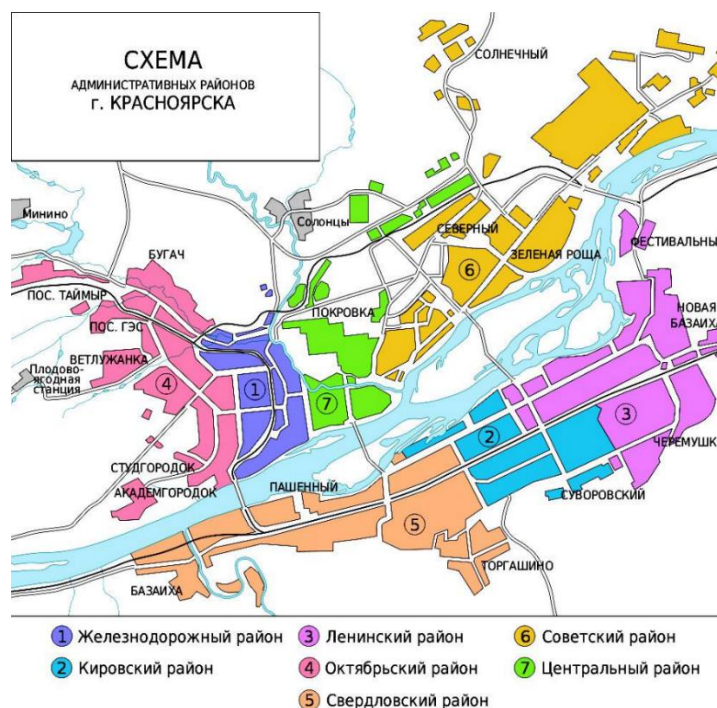


Рисунок 1.2 – Районы г. Красноярск

1.2. Рельеф

Рельеф Красноярск играет определяющую роль в формировании его метеорологического режима. Город расположен в глубокой долине реки Енисей,

окруженной с трех сторон возвышенностями и горными хребтами. С юга к нему подступают отроги Восточного Саяна, достигающие значительных высот. На севере, востоке и западе город ограничен относительно более пологими, но все же возвышенными участками Среднесибирского плоскогорья.

Южная граница городской территории ограничена отрогами Восточного Саяна. Эти горы являются мощным орографическим барьером, препятствующим проникновению воздушных масс с юга. В результате, взаимодействия воздушных масс с горным рельефом приводят к подъему их по склонам, что, в свою очередь, обуславливает формирование осадков на наветренных склонах. Зимой, горы создают эффект «заслона» для холодных арктических масс, что может приводить к образованию более устойчивых температурных инверсий в городе.

Север, восток и запад Красноярска ограничены возвышенностями Среднесибирского плоскогорья. Хотя эти возвышенности не так высоки, как Восточный Саян, они все же оказывают влияние на циркуляцию воздуха. Способствуют формированию локальных ветровых режимов и могут частично препятствовать рассеиванию загрязнений.

Сам город имеет сложный внутригородской рельеф, с перепадами высот до нескольких десятков метров. Это создает локальные микроклиматические различия, особенно в отношении температуры воздуха и скорости ветра. Низменные районы города более подвержены застою воздуха и накоплению загрязнений, в то время как возвышенности имеют лучшую вентиляцию.

Рельеф Красноярска способствует формированию температурных инверсий, особенно зимой. Холодный воздух скапливается в долине, а более теплый – над ним, что приводит к ухудшению качества воздуха. В летний период, горы могут препятствовать охлаждению воздуха ночью, вызывая более высокие ночные температуры в городе.

Горы и долина Енисея создают сложный ветровой режим. В долине преобладают ветра, направленные вдоль реки, но их скорость и направление

могут сильно изменяться в зависимости от синоптической ситуации и локальных орографических факторов [2].

1.3. Гидрологический режим

Главная водная артерия города – река Енисей – играет доминирующую роль в формировании локального климата. Притоки реки Енисей имеют некоторую особенность: правых больше, чем левых. Главными считаются – рис.1.3: Ангара, Подкаменная Тунгуска, Нижняя Тунгуска.



Рисунок 1.3 – Карта гидрологического режима Красноярского края

Красноярское водохранилище, находящееся выше по течению от города, изменяет водный и термический баланс реки Енисей. Вследствие чего река не замерзает круглый год и является значительным источником тепла. Её относительно теплая вода, даже при отрицательных температурах воздуха, способствует повышению температуры прибрежных районов. Это приводит к уменьшению амплитуды колебаний температуры в приречных районах по сравнению с удаленными от реки участками. Летом, холодная вода Енисея оказывает охлаждающее воздействие на прибрежные районы, снижая

температуру воздуха. Этот эффект проявляется в большей степени в безветренную погоду.

Енисей является источником влаги, повышающим влажность воздуха в прилегающих районах. Особенно ярко это проявляется в летние месяцы вследствие активного испарения с речной поверхности. Возникающая повышенная влажность воздуха часто приводит к формированию туманов в переходные сезоны, когда температурная разница между водой и атмосферой особенно велика.

Кроме Енисея, в черте города и его окрестностях существуют многочисленные мелкие реки, ручьи и озера. Одни из самых крупных и значимых — это реки Кача и Мана. Хотя их влияние на общий метеорологический режим менее значительно, чем у Енисея, они могут создавать локальные микроклиматические особенности в отношении влажности воздуха и температурного режима в прибрежных зонах. В частности, заболоченные районы могут создавать условия повышенной влажности и туманобразования[3].

1.4. Климатические условия.

Климат г. Красноярска определяется несколькими ключевыми факторами: географическим положением в умеренных широтах, влиянием Сибирского антициклона, близостью горных хребтов и особенностями рельефа (глубокая долина реки Енисей), а также антропогенным воздействием.

Для региона характерен резко континентальный климат, проявляющийся следующими особенностями:

- ярко выраженная сезонность с продолжительным зимним периодом (при недостаточном снежном покрове);
- короткий, но достаточно теплый летний сезон;
- быстрая весна с дефицитом осадков и вероятностью поздних заморозков;

- непродолжительный осенний период с ранним похолоданием и периодическими потеплениями.

Преобладающим типом атмосферной циркуляции на протяжении года является циклоническая деятельность. Однако в зимний период доминирующее влияние сибирского антициклона приводит к установлению устойчивых морозных условий [4].

2. ОПИСАНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ГОРОДА КРАСНОЯРСКА

2.1. Температурный режим

Термический режим исследуемого района формируют в основном радиационные и циркуляционные факторы, а также характер подстилающей поверхности. Помимо факторов крупного масштаба, тепловой режим зависит от местных особенностей: характера рельефа (как среднего, так и мелкого масштаба), типа растительности, почвенного состава, близости водоёмов и особенностей застройки. Под их влиянием наблюдаются существенные перепады температур на ограниченных пространствах - от нескольких километров до нескольких сотен метров. Влияние орографии на температурный режим наиболее заметно в зимнее время, когда под действием сибирского максимума на длительное время устанавливается малооблачная погода, что способствует радиационному выхолаживанию воздуха. Над котловинами образуются мощные инверсии, способствующие скоплению холодного воздуха на их дне. Исследуемые данные по температурному режиму за период 2012-2022 взяты со станции Красноярск Опытное поле из ежегодных данных ФГБУ «Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (далее «Среднесибирское УГМС»).

За изучаемый период средняя годовая температура в Красноярске составила +2,9 °С. Наиболее холодным месяцем является январь со средней температурой -18,6 °С. В феврале температура несколько повышается (в среднем на 2,2 °С по сравнению с январем), что связано с преобладанием холодных арктических воздушных масс (северо-западных, северных и особенно северо-восточных), а также устойчивым антициклоническим режимом, усиливающим ночное выхолаживание. В марте наблюдается резкое потепление (на +9 °С относительно февраля) благодаря увеличению солнечной радиации и ослаблению температурной инверсии. После схода снежного покрова воздух

прогревается особенно интенсивно: переход через +7 °С происходит в конце апреля. В мае температурный рост продолжается, однако сохраняется вероятность заморозков из-за возможных вторжений арктического воздуха. Наиболее теплым месяцем года является июль. Сведения о структуре информации приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Среднемесячная температура воздуха в Красноярске за период 2012-2022

Месяц	Температура воздуха, °С
январь	-18,6
февраль	-16,4
март	-7,5
апрель	1,2
май	8,5
июнь	14,7
июль	18,4
август	16,5
сентябрь	9,3
октябрь	-1.2
ноябрь	-11.5
декабрь	-15.4
Год	2,9

Как видно из рис. 2.1, на протяжении июля в период 2012-2022 среднесуточная температура неизменно держалась выше 15°С, при этом в течение десяти дней месяца она превышала 19 °С.

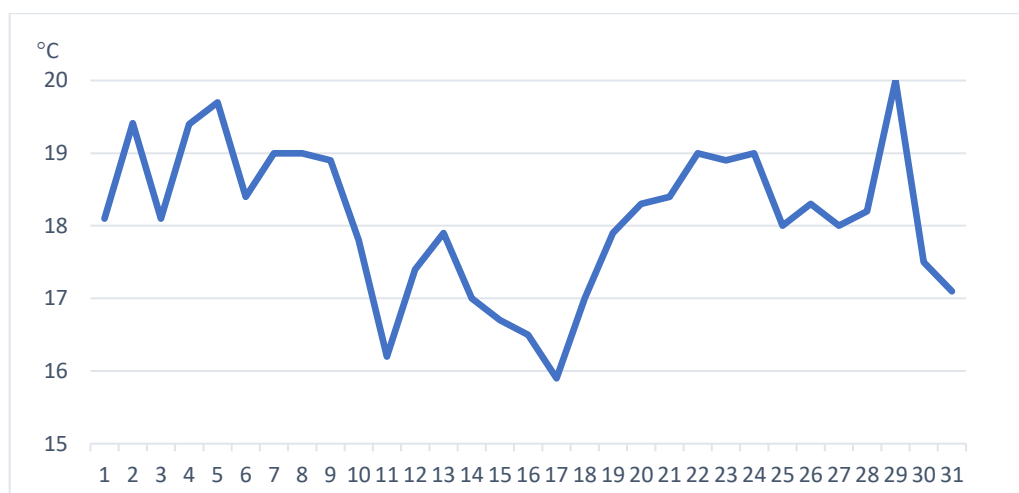


Рисунок 2.1 – График среднесуточной температуры в июле в Красноярске за период 2012-2022

Как следует из анализа рисунков 2.2-2.3, в течение исследуемого десятилетия (2012-2022) температурный режим характеризовался следующими особенностями: постепенное снижение температуры начиналось в августе, а переход через нулевую отметку к отрицательным значениям происходил в конце второй - начале третьей декады октября [5].

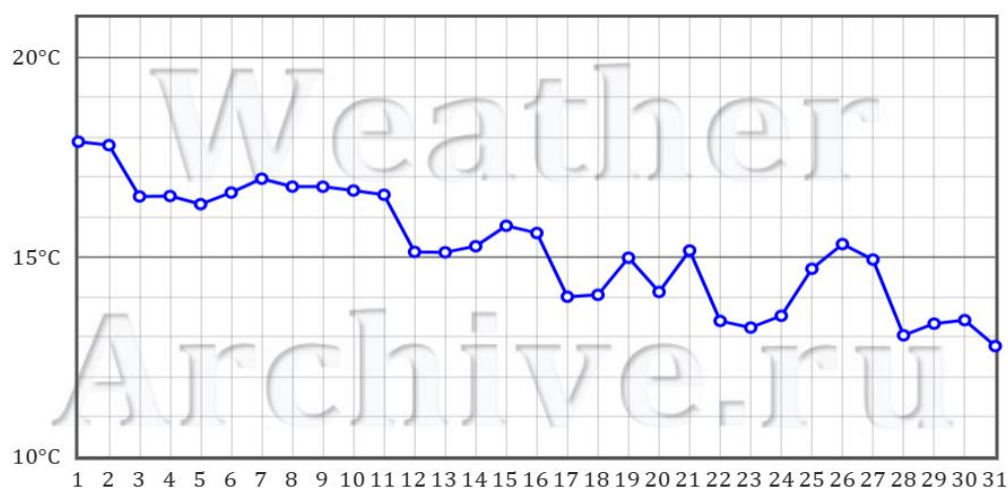


Рисунок 2.2 – График среднесуточной температуры в августе в Красноярске за период 2012-2022



Рисунок 2.3 – График среднесуточной температуры в октябре в Красноярске за период 2012-2022

Исследование температурного режима требует рассмотрения не только средних показателей, но и частоты различных отклонений от нормы. Как показано на рисунке 2.4, в период 2012-2022 месячные температуры отклонялись от многолетних средних значений как в холодный (январь-март), так и в теплый период (апрель-сентябрь), при этом отрицательные отклонения преобладали над положительными.



Рисунок 2.4 – График отклонения среднемесячной температуры воздуха от многолетней средней температуры воздуха в Красноярске за период 2012-2022

Анализ температурной динамики за 2012-2022 (рис. 2.5-2.6) выявляет наиболее интенсивный рост среднесуточных показателей в весенний период. Особенно выраженное повышение наблюдается: в марте с разницей между третьей и первой декадами $+7,7^{\circ}\text{C}$ и в апреле, где междекадный контраст достигает $+16^{\circ}\text{C}$.

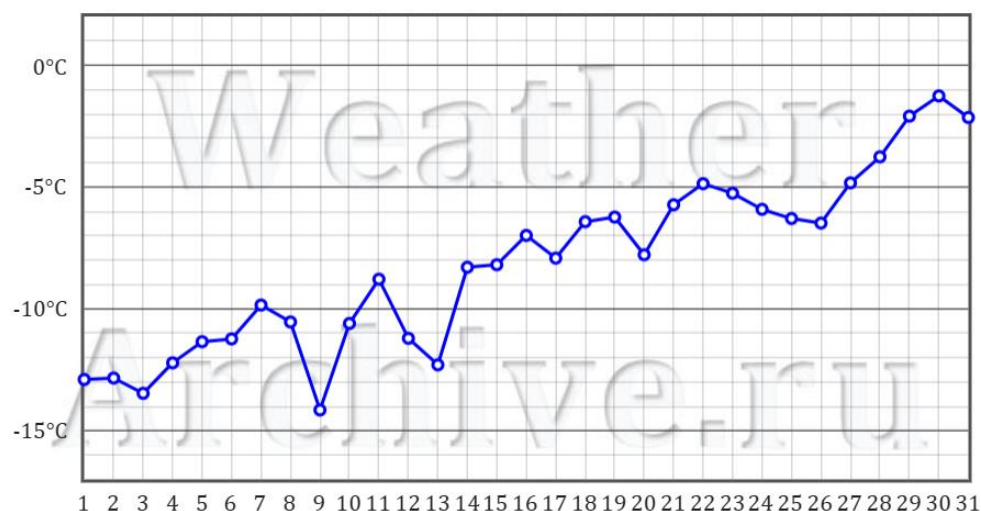


Рисунок 2.5 – График среднесуточной температуры в марте в Красноярске за период 2012-2022

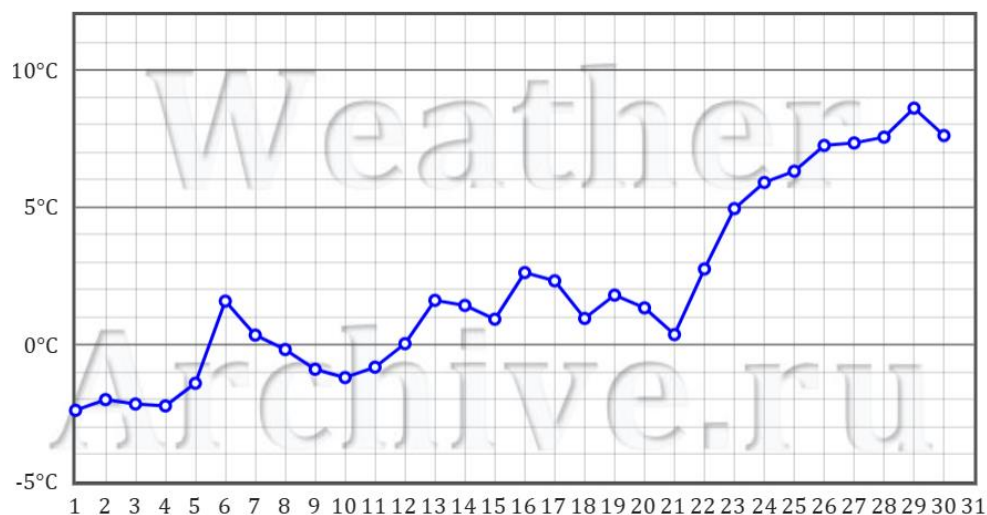


Рисунок 2.6 – График среднесуточной температуры в апреле в Красноярске за период 2012-2022

Согласно данным, представленным на рисунке 2.7, средняя минимальная температура января на $3,0^{\circ}\text{C}$ ниже, чем в феврале, тогда как средняя максимальная температура февраля превышает январский показатель на $4,1^{\circ}\text{C}$ благодаря увеличению продолжительности светового дня и более высокому

положению солнца над горизонтом. В переходные сезоны температурные значения в начале и конце месяца могут существенно отклоняться от среднемесячных показателей.

Абсолютные максимумы температур демонстрируют потенциальный диапазон колебаний температуры воздуха. Средние месячные значения абсолютных амплитуд отражают часто встречающихся колебания температур в течение месяца, тогда как абсолютная амплитуда определяет максимально возможный разброс температурных значений, характерный для Красноярска в течение одного месяца.

На рисунке 2.7 за период 2012-2022 на станции Красноярск Опытное поле самый высокий абсолютный максимум температуры воздуха был в июле (35,4 °C), а самый низкий абсолютный минимум — в январе (-34,8 °C).

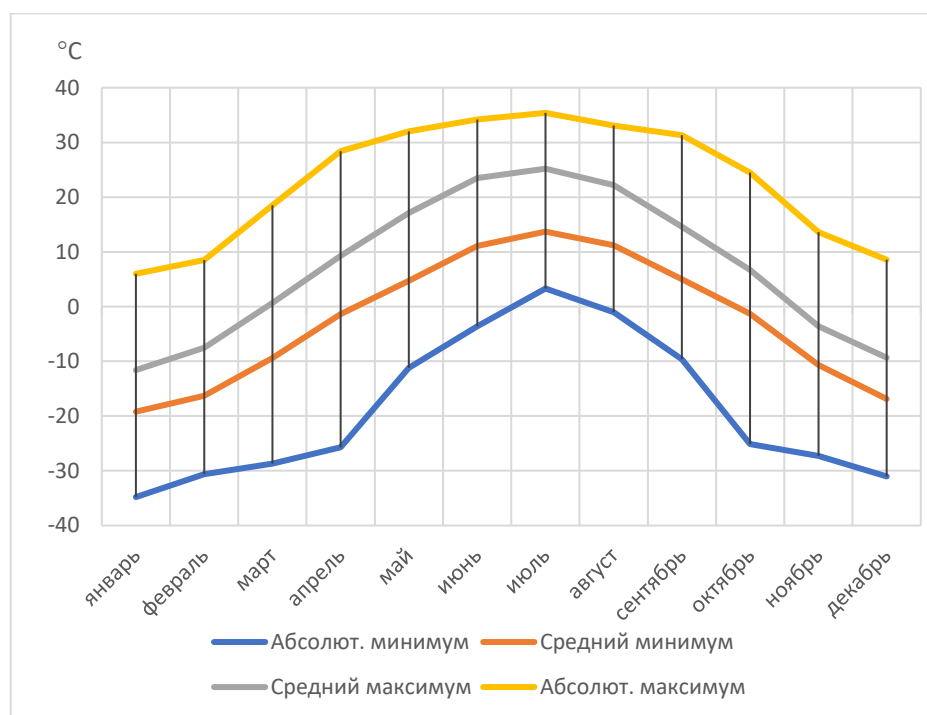


Рисунок 2.7 – График годового хода температуры воздуха в Красноярске за период 2012-2022

Анализ данных таблицы 2.2 за 2012-2022 выявляет четко выраженную сезонную динамику средних и абсолютных месячных амплитуд температурных колебаний: минимальные значения наблюдаются в июле (летний период), тогда как с октября амплитуды постепенно возрастают, достигая своего максимума в декабре-январе. В годовом цикле наименьшие значения среднесуточной

амплитуды температур (2-4°C) наблюдаются с октября по февраль. Начиная с марта, благодаря усилению дневного прогрева, амплитуда увеличивается до 6-7°C, достигая максимума в июне-июле (8°C). В августе-сентябре показатели вновь снижаются до 6-7°C вследствие ночного теплообмена почвы, который компенсирует эффективное излучение и сглаживает температурные колебания.

Таблица 2.2 – Амплитуда колебаний среднемесячных и абсолютных температур воздуха в Красноярске за 2012-2022

Месяца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Средняя амплитуда колебания, °C	36	36	38	31	34	29	25	28	29	32	34	38
Абсолютная амплитуда колебания, °C	9	50	57	57	45	41	33	36	50	56	56	39

2.2. Атмосферное давление

Данные по атмосферному давлению за период 2012-2022 взяты со станции Красноярск Опытное поле из ежегодных данных ФГБУ «Среднесибирское УГМС». Анализ данных на рисунке 2.8 демонстрирует четко выраженную сезонную динамику среднемесячного атмосферного давления с характерными максимумами в зимний период (декабрь-февраль) и минимумами летом (июнь-июль). Годовой цикл давления характеризуется плавным нарастанием значений с июля (981,9 гПа) до января (1001,9 гПа), с последующим постепенным снижением в весенние месяцы. Пиковые значения отмечаются в декабре (1007,2 гПа) при активизации азиатского антициклона, хотя в отдельные годы зимой возможно падение давления до 961,0 гПа. За весь исследуемый период 2012-2022 годов абсолютный минимум составил 952,9 гПа.

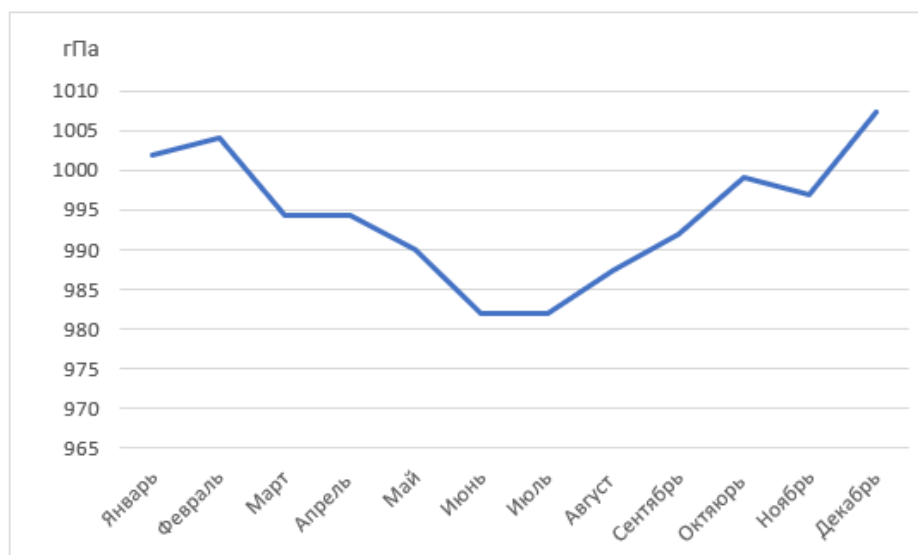


Рисунок 2.8 – График годового хода среднемесячного атмосферного давления в Красноярске за период 2012-2022

2.3. Ветровой режим

Ветровой режим находится в прямой зависимости от распределения атмосферного давления и его сезонных колебаний. На приземную скорость ветра существенное влияние оказывает турбулентное перемешивание воздушных масс: в летний период его усиление в дневное время приводит к возрастанию скорости ветра, тогда как ночью летом и в течение большей части зимних суток формирование температурной инверсии и ослабление турбулентности способствуют снижению скорости ветра, создавая дополнительный минимум в зимние месяцы. Для Красноярска характерна относительная стабильность ветрового режима в течение года, обусловленная особенностями орографических условий. Данные по ветровому режиму за период 2012-2022 взяты со станции Красноярск Опытное поле из ежегодных данных ФГБУ «Среднесибирское УГМС».

Анализ ветрового режима (рис. 2.9) показывает, что ориентация долины Енисея, совпадающая с преобладающим направлением воздушных потоков, определяет высокую повторяемость юго-западных ветров в течение всего года (30-53%). В январе их доля в сочетании с западными ветрами достигает 80%, тогда как с апреля по август частота этих направлений снижается до 40-45%.

Зимой северные, восточные и юго-восточные ветры наблюдаются редко (1-3%), в то время как в теплый сезон отмечается увеличение повторяемости северо-восточных, западных и восточных ветров (до 13%) [6].

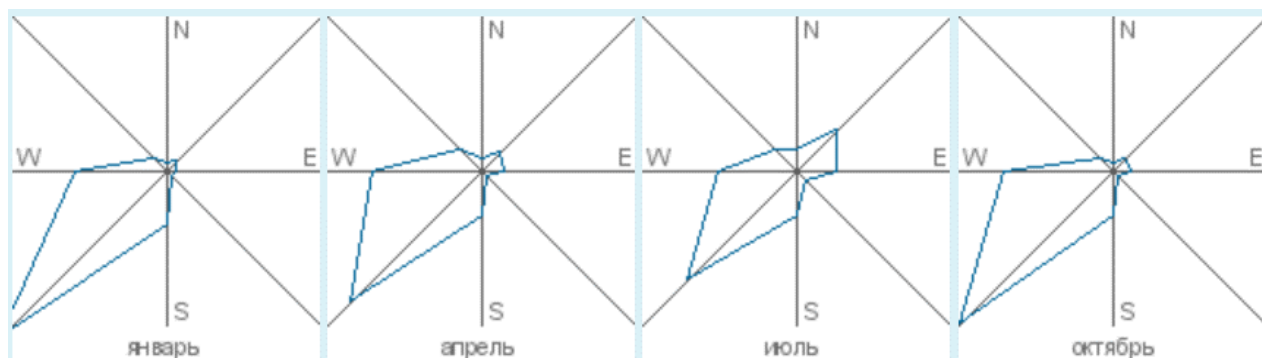


Рисунок 2.9 – Среднемесячная повторяемость (%) преобладающих направлений ветра за январь, апрель, июль и октябрь в Красноярске за период 2012-2022

В переходные периоды (весна и осень) происходит трансформация барического поля, сопровождающаяся умеренным увеличением повторяемости северных ветров (до 13%) при сохранении преобладания юго-западных и западных воздушных потоков.

В условиях крупного города с плотной застройкой наблюдается изменение естественного направления ветровых потоков, которые начинают следовать вдоль прямолинейных городских магистралей. В результате термической конвекции нагретый воздух поднимается вверх, замещаясь более холодными воздушными массами с периферийных районов, что формирует циркуляционные потоки циклонического типа. При устойчивой ясной погоде локальные температурные контрасты могут создавать небольшие вихревые образования даже в пределах внутриквартальных пространств и дворовых территорий.

Анализ распределения скоростей ветра показывает соответствие с частотой их направлений: максимальные средние значения характерны для южных и юго-западных потоков. Однако в целом скоростные показатели демонстрируют более сбалансированное распределение по направлениям. В июльский период, несмотря на преимущественную ориентацию розы ветров в меридиональном направлении (север-юг), наблюдается выравнивание

скоростных характеристик за счет усиления воздушных потоков восточного и западного направлений.

Согласно данным таблицы 2.3 за 2012-2022, сезонная динамика скорости ветра характеризуется минимальными показателями в летний период (1,6-1,7 м/с в июле-августе), что связано с трансформацией воздушных масс и ослаблением циклонической активности. В эти месяцы слабые ветры (0-1 м/с) наблюдаются в 10-11% случаев. Максимальные средние скорости (2,5-2,7 м/с) регистрируются в переходные сезоны (апрель-май, октябрь-ноябрь) при усилении циклонических процессов.

Таблица 2.3 – Среднемесячная скорость ветра в Красноярске за период 2012-2022

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	год
Скорость ветра, м/с	2,3	2,2	2,5	2,7	2,5	2,0	1,6	1,7	2,0	2,6	2,6	2,6	2,3

Согласно данным таблицы 2.4, в Красноярске в течение всего года отмечаются сильные ветры (≥ 15 м/с), при этом их частота имеет выраженную сезонную динамику. В среднем за год фиксируется свыше 50 дней с подобными ветровыми условиями. Наибольшая повторяемость наблюдается в зимний период и межсезонье: максимальные средние значения приходятся на январь (3,8 дня, с абсолютным максимумом 11 дней), март и май (до 9 дней, с рекордными 15 днями). Наименьшая активность характерна для летних месяцев - июль (1 день в среднем, максимум 4 дня) и август (0,7 дня в среднем).

Таблица 2.4 – Среднее число дней со скоростью ветра ≥ 15 м/с в Красноярске за период 2012-2022

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
Число дней	3,8	2,2	9,0	7,4	9,0	2,2	1,0	0,8	2,6	3,4	5,2	6,0	52,6

Ветровые режимы различаются по продолжительности в зависимости от скорости воздушных потоков. Наиболее устойчивыми являются слабые ветры со скоростью до 4 м/с, которые в отдельные периоды могут наблюдаться непрерывно в течение 2-3 суток в любом месяце года. При скорости свыше 5 м/с

продолжительность непрерывного действия ветра существенно сокращается: зимой до 1,5-2 суток, летом - обычно не превышает 2 часов, хотя в отдельные годы может достигать 10 часов. Более сильные ветры (свыше 8 м/с) на протяжении большей части года (кроме июля-августа) сохраняются непрерывно в течение 5-10 часов.

2.4. Атмосферные осадки

Атмосферные осадки представляют собой водные отложения (измеряемые в миллиметрах), образующиеся при конденсации влаги в атмосфере и выпадающие на земную поверхность в различных формах: жидких (дождь), твердых (снег, град, снежная крупа) или смешанных. По способу образования различают: 1) облачные осадки (выпадающие из облаков) и 2) наземные (осадки осаднения - роса, иней, изморозь, формирующиеся непосредственно на поверхностях). По характеру выпадения осадки классифицируют на три типа: обложные, морозящие и ливневые. Данные по атмосферным осадкам за период 2012-2022 взяты со станции Красноярск Опытное поле из ежегодных данных ФГБУ «Среднесибирское УГМС».

Обложные осадки формируются в слоисто-дождевых и высокослоистых облаках, отличаются продолжительностью (от нескольких часов до суток) и значительным охватом территории. Морозящие осадки, связанные со слоистыми облаками, представлены мельчайшими водяными каплями (диаметром менее 0,5 мм) или кристаллами льда, создающими эффект "парящей" влаги. Ливневые осадки кучево-дождевого происхождения характеризуются: резким началом и окончанием, высокой интенсивностью, локальным распространением, крупноразмерными элементами (каплями >1 мм или снежными хлопьями), выраженной изменчивостью интенсивности.

В зависимости от вида атмосферных осадков год условно разделен на два периода: период с выпадением преимущественно твердых осадков — холодный (ноябрь — март) и период с преобладанием жидких осадков — теплый (апрель — октябрь).

Согласно данным рисунка 2.10 за 2012-2022, в Красноярске наблюдается выраженная сезонность выпадения осадков. Основная их часть (до 72%) приходится на тёплый период года, при этом около 20% годового количества составляют твёрдые осадки. В переходные месяцы (март-апрель и октябрь-ноябрь) преобладают смешанные формы осадков (снег с дождём, мокрый снег, ледяной дождь), которые в сумме дают 9% от общего годового количества. Среднегодовое значение осадков составляет 487 мм, из которых 153 мм выпадает в период с октября по март. Минимальные месячные показатели (12-17 мм) регистрируются с января по март, тогда как с апреля наблюдается постепенный рост, достигающий пика в августе (195 мм).

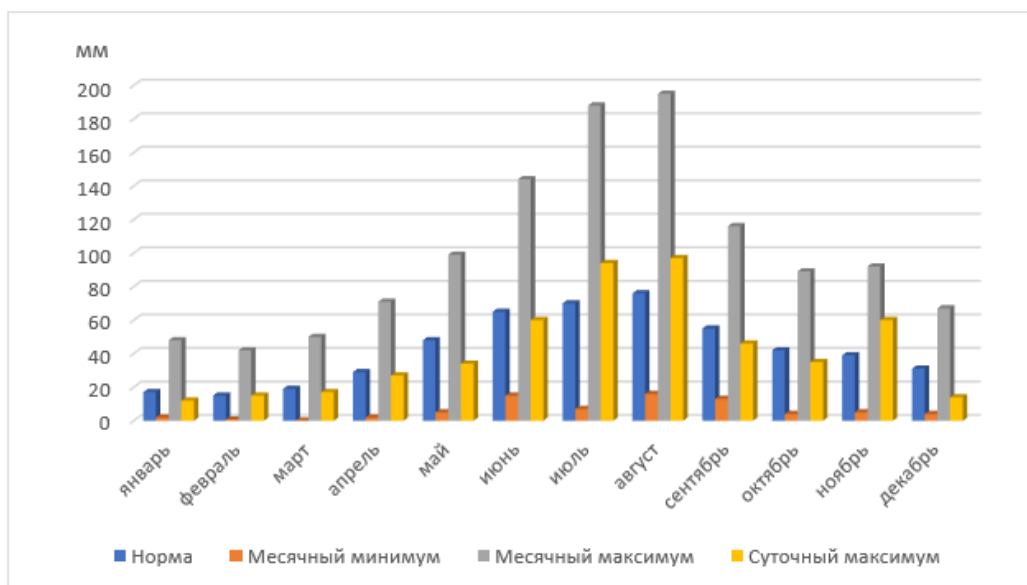


Рисунок 2.10 – График годового хода изменения количества осадков в Красноярске за период 2012-2022

Анализ межгодовой изменчивости осадков показывает существенные отклонения от среднемноголетних значений. Разброс годовых сумм достигает 300 мм: например, в 2020 году зафиксировано 730 мм, тогда как в 2022 - лишь 401 мм. Сезонные различия проявляются и в продолжительности осадков: зимний период характеризуется более длительными эпизодами (до 200 часов), летний - более короткими (до 80 часов). Статистический анализ выявляет преобладание кратковременных осадков: 57% обложных и 81% ливневых осадков длятся менее 6 часов.

2.5. Режим увлажнения

Влажность воздуха характеризуется тремя ключевыми параметрами, отражающими степень увлажнения:

- упругость водяного пара - величина парциального давления, выражаемая в миллибарах, миллиметрах ртутного столба или в гектопаскалях.;
- относительная влажность - процент насыщения воздуха водяным паром;
- дефицит насыщения - разница между максимально возможной и фактической упругостью водяного пара.

Упругость водяного пара представляет собой абсолютное содержание влаги в воздухе, тогда как относительная влажность показывает, насколько воздух близок к состоянию насыщения. Дефицит насыщения количественно характеризует эту разницу.

Влажностный режим атмосферы демонстрирует устойчивые сезонные и суточные колебания. Парциальное давление водяного пара, находящееся в прямой зависимости от температурных условий, возрастает с повышением температуры воздуха, что обусловлено увеличением его влагоемкости. Годовая динамика упругости пара синхронна температурному режиму: пиковые значения регистрируются в летний период (максимум в августе), минимальные - в зимние месяцы. Суточная цикличность в холодный сезон повторяет температурную кривую с достижением наибольших значений днём и снижением до минимума перед восходом солнца. Данные по влажности за период 2012-2022 взяты со станции Красноярск Опытное поле из ежегодных данных ФГБУ «Среднесибирское УГМС».

Анализ данных за 2012-2022 (рис. 2.11) показывает обратную зависимость между годовыми изменениями относительной влажности и упругости водяного пара в период с января по май. Минимальные значения относительной влажности (54-58%) фиксируются весной (апрель-май) вследствие интенсивного прогрева приземного слоя атмосферы при малом количестве осадков, причем абсолютный минимум (54%) отмечается в мае. К августу показатель возрастает до 76%, после чего следует кратковременное снижение влажности на фоне резкого уменьшения упругости пара. С наступлением устойчивых морозов в ноябре-декабре относительная влажность вновь повышается до 74% [7].

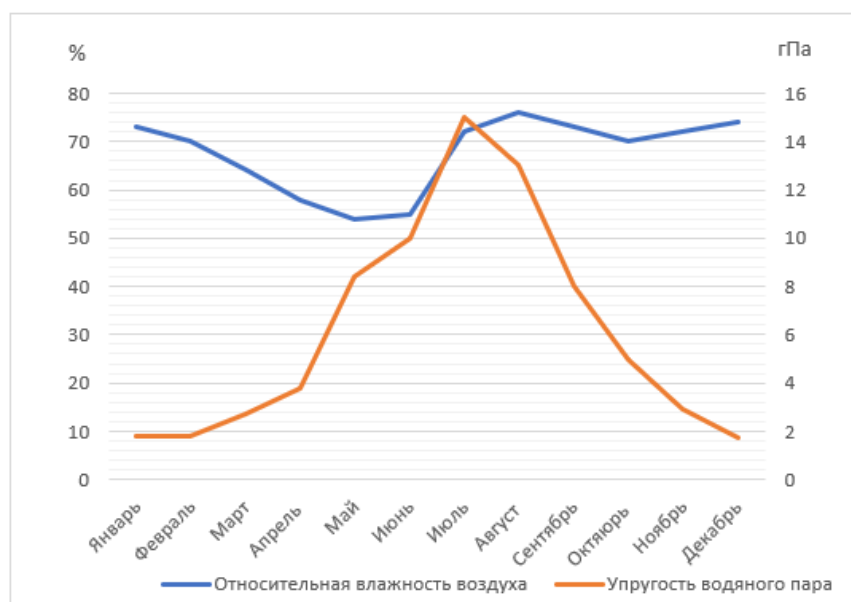


Рисунок 2.11 – График годового хода среднемесячной относительной влажности воздуха и среднемесячной упругости водяного пара в Красноярске за период 2012-2022

2.6. Атмосферные явления

Данные по атмосферным явлениям за период 2012-2022 взяты со станции Красноярск Опытное поле из ежегодных данных ФГБУ «Среднесибирское УГМС».

Туманы - опасное погодное явление, особенно неблагоприятное для всех видов транспорта. В Красноярске они наблюдаются в основном в холодное время года. Их образование связано с охлаждением и увлажнением поверхностного

слоя. В зависимости от погодных условий туман в городе может быть радиационным (при сильных морозах), адвективным или адвективно-радиационного типа. При низких температурах и высокой влажности образуется замерзающий туман.

Количество дней с туманами значительно варьируется от года к году: от 19 в 2013 году до 3 в 2019 году, при среднегодовом значении 10 (таблица 2.6). Наименьшее число туманов (1–2 дня) наблюдается весной (март–май), а наибольшее (12–15 дней в месяц) — с июля по сентябрь. Пик повторяемости туманов (20% от общего количества) приходится на август. В течение суток чаще всего (21% случаев) туманы образуются днём и вечером (с 16 до 22 часов). При этом в ноябре–январе они могут возникать в любое время с максимумом между 9 и 12 часами, а летом — ночью или ранним утром. Продолжительность туманов напрямую зависит от их частоты в месяц. Почти ежегодно (95% случаев) в Красноярске фиксируется 16 дней с туманами общей продолжительностью 50 часов (таблица 2.5).

Наибольшая продолжительность туманов, как и их частота, характерна для холодного периода при антициклональной погоде, особенно в ясные и безветренные ночи. Чаще всего они формируются под утро или во второй половине ночи. В теплое время года днем (с 12 до 18 часов) туманы практически не наблюдаются. Важную роль в их возникновении и продолжительности играет ветер: в Красноярске туманы обычно возникают при штиле или слабом ветре. При этом зимой преобладают западные ветры, весной — северные и северо-восточные, а летом и осенью — юго-западные и западные.

Дымка явление, возникающие в результате конденсации водяного пара у земной поверхности. В отличие от тумана, она не ухудшает сильно видимость. Как и при тумане существенное влияние на возникновение дымки оказывает ветер, в большинстве случаев отмечается при штиле или слабом ветре. В Красноярске дымка наблюдается в течение всего года, чаще чем туманы. Из таблицы 2.5 следует что максимальная повторяемость дымки отличалась с

декабря по февраль — 19-27%, минимумом в мае — 2%. В течение года в среднем это явление повторялось 11%, а число дней в течение года 177.

Гроза представляет собой опасное погодное явление, характеризующееся мощными электрическими разрядами — как между облаками, так и между облаками и земной поверхностью. Чаще всего грозы наблюдаются в тёплый сезон при развитии кучево-дождевых облаков. Это явление нередко сопровождается резкими порывами ветра, интенсивными осадками и выпадением града. В редких случаях грозы могут возникать и зимой, однако их интенсивность значительно ниже, чем летом, что делает их менее опасными. Зимние грозы встречаются крайне редко.

В Красноярске ежегодно в среднем фиксируется 29 дней с грозами. Пик грозовой активности приходится на август (38% случаев), когда они могут возникать каждые 4 дня, тогда как в мае вероятность минимальна (2%) – таблица 2.5. По данным за 2012-2022, средняя продолжительность одной грозы составляет 1,3 часа, при этом максимальная длительность (до 5 часов) отмечалась в июле и августе.

Таблица 2.5 – Годовой ход числа дней с различными атмосферными явлениями в Красноярске за период 2012-2022

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	год
дождь	-	0.8	4	10	17	15	18	15	15	10	1	0.2	106
снег	21	19	18	11	6	-	-	-	2	16	25	24	119
туман	6	5	1	2	2	5	12	15	14	5	3	4	74
дымка (дым)	20	22	10	7	6	11	23	22	18	10	9	17	177
гроза	-	-	-	-	0,6	3	8	11	6	2	-	-	29
метель	5	3	2	0,4	-	-	-	-	-	0,2	5	6	22

В периоды наибольшей грозовой активности в течение суток возможно возникновение нескольких грозовых явлений. Они могут происходить в любое время, однако чаще всего наблюдаются во второй половине дня (с 14 до 18 часов)

- в период максимальной конвективной активности, а также вечером (до полуночи). Намного реже грозы случаются ночью и под утро, а в утренние часы
- особенно редко. Длительность гроз варьируется от нескольких минут до нескольких часов, причем более половины случаев (56%) длятся менее одного часа.

Метели представляют собой атмосферное явление, при котором ветер переносит снежные массы над земной поверхностью. Это природное явление значительно ухудшает видимость, создаёт проблемы для транспортного сообщения, затрудняет проведение работ на открытых пространствах и наносит существенный экономический ущерб. Как правило, метели возникают при прохождении атмосферных фронтов и увеличении барических градиентов. Наиболее интенсивные снежные бури наблюдаются при прохождении глубоких циклонов, которые вызывают усиление ветровой активности.

В Красноярске метели обычно наблюдаются с января по апрель и с октября по декабрь, составляя в среднем 3 случая за сезон (таблица 2.5). Однако в отдельные годы это количество значительно отличается от средних значений: так, зимой 2018 года зафиксировано 30 метелей, а в 2012 году - лишь 8 (таблица 2.6). Наибольшая активность метелей (5-6 дней) приходится на период с ноября по январь. Для большинства метелей (80% случаев) характерен ветер скоростью 6-13 м/с, преимущественно (72%) юго-западного направления. В 54% случаев это явление сопровождается температурой от -5 до -15°C. Наиболее опасны метели при сильных морозах, хотя случаи при температуре ниже -25°C встречаются крайне редко.

Климатические условия Красноярска в холодный период способствуют частому образованию гололёда и, в меньшей степени, кристаллической изморози. Согласно данным таблицы 2.6, гололёд наблюдается в городе ежегодно — в среднем 136 дней в году (2012–2022). Наибольшая активность этого явления приходится на весну (апрель–май) и осень (октябрь), причем рекордное количество дней с гололёдом зафиксировано в октябре 2016 года. Такая высокая повторяемость гололёдных явлений объясняется резко

континентальным климатом Красноярска и значительными суточными колебаниями температуры в зимний период [8].

Таблица 2.6 – Число дней с различными атмосферными явлениями в Красноярске за период 2012-2022

Явление	Годы											Среднее
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
Дождь	110	154	123	123	109	136	112	116	126	125	137	125
Снег	128	134	137	136	140	125	115	124	128	118	112	127
Туман	13	19	13	9	11	8	7	3	8	11	7	10
Гроза	15	32	38	29	35	36	18	39	35	25	36	31
Метель	8	21	29	28	19	15	30	18	21	29	25	22
Гололедица	149	147	141	109	159	115	145	118	134	138	143	136

3. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ ГОРОДА КРАСНОЯРСКА

Загрязнение воздуха промышленными выбросами представляет собой ключевой экологический фактор, существенно ухудшающий качество городской среды и здоровье жителей. Особенностью данного процесса является циркуляция загрязненных воздушных масс: нагретый промышленными источниками воздух поднимается вверх, охлаждается в атмосфере, затем растекается по периферии городской территории и вновь возвращается в центр. В условиях слабой ветровой активности такая центростремительная циркуляция способствует накоплению вредных веществ от промышленных объектов в городской атмосфере. Красноярск, входит в число городов России с наибольшим уровнем загрязнения воздуха.

Особенно обострилась в последние годы ситуация, вызванная ростом количества автотранспортных средств, а также увеличением объемов бытовых отходов. Рассеивание автомобильных выбросов в атмосфере принципиально отличается от распространения промышленных загрязнений. Автотранспортные выбросы поступают непосредственно в приземный воздушный слой, что приводит к формированию высоких концентраций вредных веществ у поверхности земли. Наибольшие уровни загрязнения наблюдаются на высоте 50-150 см от грунта - именно в этом диапазоне находится дыхательная зона человека, что особенно опасно для населения.

Согласно данным о предельно допустимых выбросах, крупнейшим загрязнителем атмосферы в Красноярске является ОАО «РУСАЛ Красноярск», ежегодно выбрасывающий 65 771,179 тонн вредных веществ. Это составляет 40% от общего объема промышленных выбросов города.

Среди других значительных стационарных источников загрязнения выделяются:

- Красноярская ТЭЦ-1 (21 165,7 т/год)
- Красноярская ТЭЦ-2 (18 218,3 т/год)
- Красноярская ТЭЦ-3 (12 655,98 т/год)
- ОАО «Красноярский цемент» (4 437,8 т/год)

- ООО «КрамзЭнерго» (2 709,6 т/год)
- ООО «ФармЭнерго» (2 221,0 т/год)
- Котельная ВЭС ОАО «Красмашзавод» (1 839,6 т/год)
- ОАО «ЭВРЗ» (1 755,3 т/год)
- ООО «КрАМЗ» (834,3 т/год)
- ОАО ПО «Красноярский завод комбайнов» (634,6 т/год). [9]

Рисунок 3.1 наглядно демонстрирует характерную черту промышленной инфраструктуры Красноярска - преимущественное расположение производственных объектов в пределах городской территории.

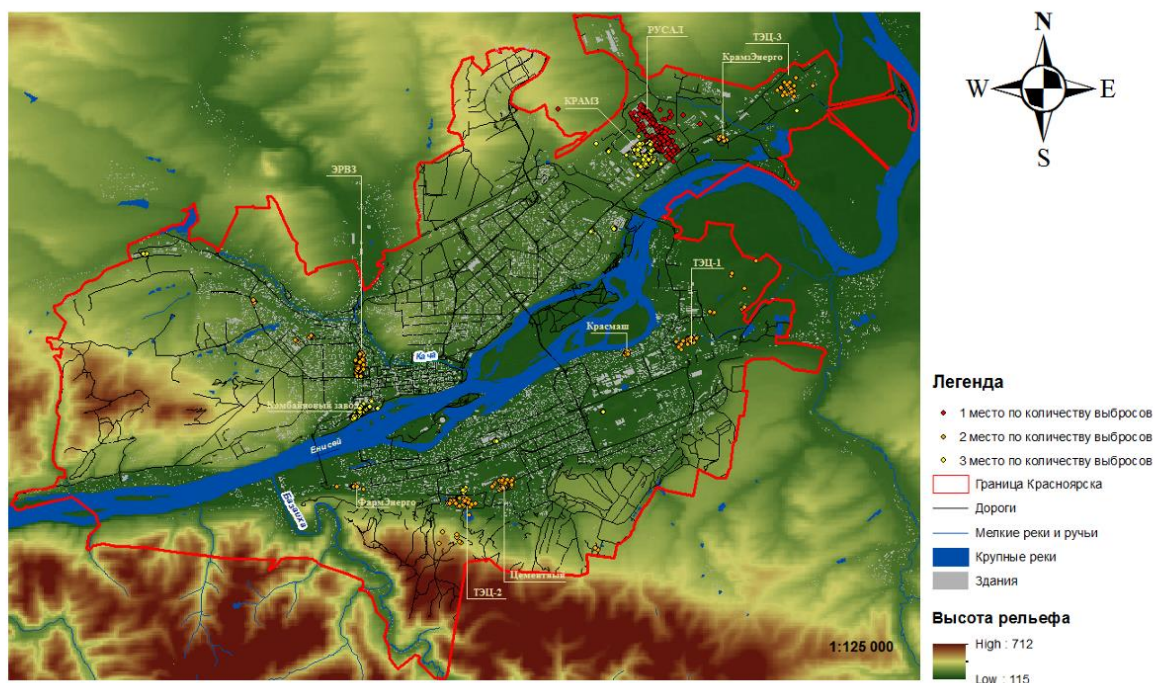


Рисунок 3.1 – Расположение основных стационарных источников загрязнения атмосферного воздуха в г. Красноярске

Наиболее экологически благополучными считаются районы города с минимальным техногенным влиянием - без промышленных объектов и с обилием зеленых насаждений. Однако даже эти территории могут подвергаться загрязнению при определенных метеоусловиях, когда ветер не выводит вредные вещества за пределы города, а лишь перераспределяет их по всей городской

территории. Именно поэтому специалисты в области экологии считают, что благоприятных районов в экологическом плане в Красноярске нет.

В 2022 г. уровень загрязнения г. Красноярска характеризуется как «очень высокий». Комплексный индекс загрязнения атмосферы ИЗА5 > 14, стандартный индекс — 34,2 (по бенз(а)пирену), наибольшая повторяемость превышения ПДКм.р. — 13,9 % (по формальдегиду). Основной вклад в уровень загрязнения вносят бенз(а)пирен, формальдегид, оксид азота, диоксид азота и взвешенные вещества-рис.3.2 [9].

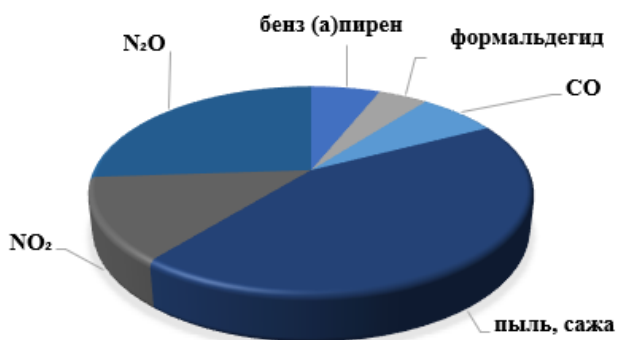


Рисунок 3.2 – Вещества, которые в значительной степени влияют на уровень загрязнения атмосферного воздуха в Красноярске (согласно данным парциальных ИЗА).

3.1. Режим «Черного неба».

В Красноярске с 2012 года регулярно объявляется режим черного неба. Его введение связано с возникновением специфических погодных условий, препятствующих рассеиванию вредных выбросов в атмосфере и приводящих к их временному накоплению. Данное явление обусловлено особенностями географического положения города и техногенной нагрузкой, проявляясь преимущественно в периоды экстремальных температур (как морозов, так и жары) при отсутствии ветра.

Заводы выбрасывают в атмосферу колоссальное количество вредных веществ, которые при влажности и отсутствии ветра не способны рассеиваться, а как следствие – накапливаются в воздухе.

В основном в городе вводится первый режим неблагоприятных метеоусловий (далее НМУ). Второй режим с 2012 года вводился единожды — в январе 2016 года, когда город был в режиме НМУ 19 дней подряд.

Образовавшийся над Красноярском смог часто видно невооруженным глазом. Это и есть «черное небо». Хотя на самом деле в эти дни оно не черное, а серо-коричневое – рисунок 3.3

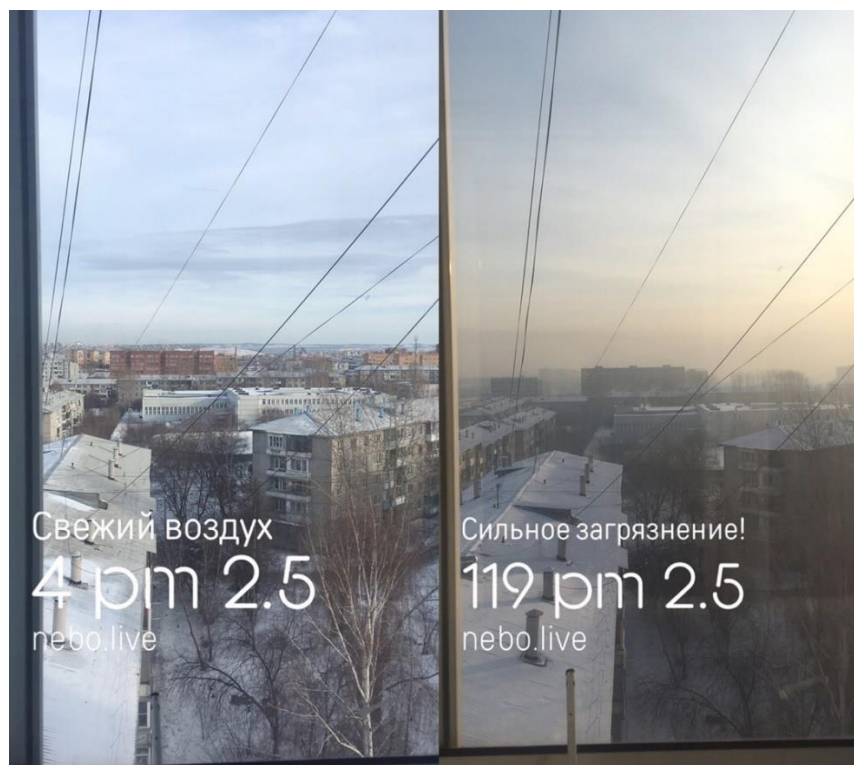
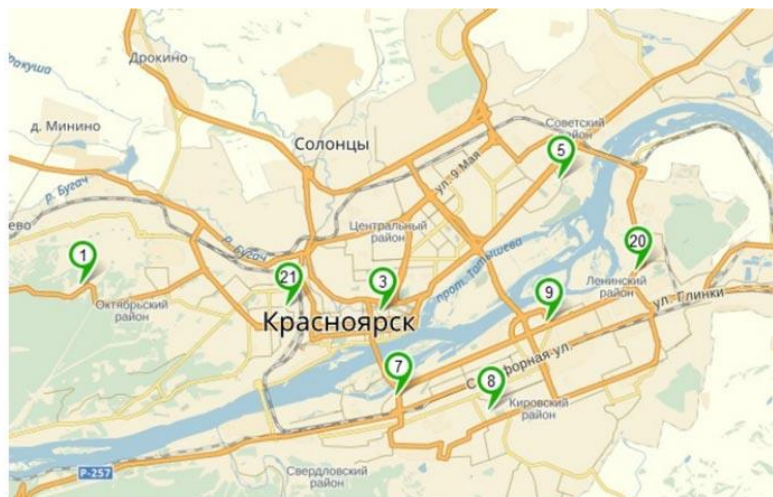


Рисунок 3.3 – Сравнение загрязнённости воздуха при различной концентрации ультрадисперсных частиц $PM_{2.5}$

Мониторинг качества атмосферного воздуха в Красноярске осуществляется сетью из 8 автоматизированных станций наблюдения (рисунок 3.4), находящихся в ведении ФГБУ "Среднесибирское УГМС" - ключевого органа экологического контроля региона. Данное федеральное учреждение отвечает за выявление метеорологических условий, способствующих концентрации загрязняющих веществ, и принимает решение о введении режима НМУ [10].



ПНЗ №1 — ул. Минусинская, 14д	ПНЗ №8 — ул. Кутузова, 92ж
ПНЗ №3 — ул. Сурикова, 54м	ПНЗ №9 — ул. Чайковского, 7д
ПНЗ №5 — ул. Быковского, 4д	ПНЗ №20 — ул. 26 Бакинских Комиссаров, 26д
ПНЗ №7 — ул. А. Матросова, 6д	ПНЗ №21 — ул. Красномосковская, 32д

Рисунок 3.4 – Расположение пунктов контроля воздуха ФГБУ
«Среднесибирское УГМС» в городе Красноярске

Режим неблагоприятных метеоусловий (НМУ) вводится с целью минимизации антропогенной нагрузки на атмосферу в периоды ухудшения её рассеивающей способности. Такие ситуации возникают при слабой ветровой активности или температурной инверсии, создающих риск повышения концентрации вредных веществ. В рамках режима реализуется комплекс ограничительных мер:

1. Для промышленных предприятий:

- обязательное сокращение выбросов на 15-20% (стандартное требование для НМУ 1 степени)

2. Для населения:

- рекомендация по переходу на общественный транспорт
- ограничение времени пребывания на открытом воздухе при обнаружении посторонних запахов [11].

4. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ

Как и другие элементы природной среды, атмосфера способна к естественному самоочищению. Загрязняющие вещества, возникающие в результате человеческой деятельности, проходят через различные процессы очистки: оседание на зданиях, растениях и почве, вымывание осадками, а также перенос воздушными массами далеко от места выброса. Эти естественные механизмы очистки зависят от метеорологических условий, таких как сила ветра, температура, уровень солнечной радиации и количество осадков. При постоянном поступлении загрязнений данные факторы вызывают существенные изменения концентрации вредных веществ в приземном слое атмосферы.

4.1. Солнечная радиация

Солнечная радиация является важнейшим фактором, влияющим на процессы атмосферного загрязнения. Ее высокая интенсивность может создавать фотохимические реакции, так, например при окислении сернистого газа, происходит образование сульфатных аэрозолей. При ясной безветренной погоде фотохимические реакции могут образовывать фотохимический смог. Несмотря на наличие у солнечной радиации факторов, влияющих на загрязнение атмосферы, она также способствует ее очищению. Интенсивный прогрев солнцем в ясную погоду способствует изменению вертикального градиента. Это может приводить к усилению ветра в приземном слое и рассеиванию загрязняющих веществ.

4.2. Температура

Метеорологические факторы, такие как температурное расслоение атмосферы и интенсивность воздушных потоков, оказывают схожее воздействие на уровень загрязнения в различных городских условиях независимо от времени года. Наблюдения показывают, что при повышении температурных показателей происходит уменьшение рассеивания теплых промышленных выбросов. Это

закономерно приводит к увеличению содержания вредных веществ в приземных слоях. Особенно заметно данное явление проявляется при анализе слабонагретых промышленных выбросов, где его влияние становится наиболее значимым.

Метеорологические условия оказывают существенное влияние на распределение вредных примесей в городской атмосфере. В жаркие периоды при слабой циркуляции воздушных масс наблюдается значительное скопление загрязнений в приземном слое. Напротив, в условиях пониженных температур концентрация вредных веществ в городской среде снижается. Эти наблюдения позволяют сделать вывод о прямой зависимости между температурным режимом и уровнем атмосферного загрязнения.

Особый интерес представляет сезонная динамика: в летний период отмечается снижение температуры промышленных выбросов. Данный фактор, наряду с другими метеорологическими условиями, способствует тому, что именно в теплое время года, несмотря на общее уменьшение объема выбросов, во многих урбанизированных районах фиксируются пиковые значения концентрации загрязняющих веществ.

4.3. Инверсии температуры

Температурная инверсия — это явление, при котором температура воздуха повышается с высотой, в отличие от её обычного понижения в тропосфере. Инверсии могут возникать как у поверхности земли (приземные инверсии), так и в свободной атмосфере. Приземные инверсии чаще всего формируются ночью при штиле (или иногда днём зимой) из-за сильного охлаждения поверхности земли через тепловое излучение, которое также понижает температуру прилегающего слоя воздуха. Их мощность варьируется от нескольких десятков до сотен метров. В пределах инверсионного слоя перепад температур может составлять от десятых долей градуса до 15–20 °С и выше.

Температурные инверсии играют роль своеобразного экрана, препятствующего нормальному воздухообмену в атмосфере. Эти атмосферные явления создают преграду для вертикальных потоков, что способствует накоплению влаги, микрочастиц и аэрозолей. В результате наблюдается интенсивное образование смога и плотных туманов. Особую угрозу для экологии крупных городов представляют приземные инверсионные явления, особенно в сочетании с минимальной ветровой активностью. Такие метеорологические условия приводят к эффекту "застоявшегося воздуха", когда вредные примеси концентрируются в приземном слое, создавая опасную для здоровья людей ситуацию.

В холодный период года наблюдается значительное повышение уровня загрязнения воздуха. Зимние инверсии чаще всего возникают в зонах действия антициклонов, что объясняет резкий рост концентрации вредных примесей, включая дымовые частицы, при устойчивой антициклональной погоде [12].

4.4. Осадки

Многочисленные исследования подтверждают, что атмосферные осадки играют важную роль в естественной очистке воздушной среды. Интенсивные дождевые потоки демонстрируют более выраженный очищающий эффект по сравнению с продолжительными морозящими осадками. Наблюдается прямая зависимость между силой дождя и скоростью выведения сернистого ангидрида из воздушного бассейна. Аналогичная динамика характерна для диоксида азота - его содержание в атмосфере существенно снижается во время дождливых периодов. Особенно показателен процесс исчезновения озона и прочих окислительных соединений в теплое время года: после прохождения ливня их концентрация в воздушном пространстве стремится к нулевым показателям.

Атмосферные осадки с повышенной кислотностью представляют собой дождь, снег или туман, содержащие химические соединения, понижающие

водородный показатель ниже 5,6 единиц. В их состав преимущественно входят производные серной и азотной кислот, попадающие на земную поверхность как в жидком, так и в твердом состоянии. Экологические последствия таких осадков проявляются в постепенном закислении природной среды - почвенного покрова, пресноводных озер и рек. Механизм этого явления связан с химической трансформацией атмосферных загрязнителей (преимущественно сернистого ангидрида и азотистых соединений) в кислотные компоненты под действием атмосферных процессов, что существенно меняет их физико-химические характеристики.

Промышленные объекты энергетического и металлургического комплексов, использующие углеводородное топливо (нефтепродукты и уголь) в технологических процессах, являются источниками образования азотнокислых соединений. В процессе эксплуатации этих предприятий, наряду с автомобильными выбросами, в воздушный бассейн поступают значительные объемы сернистого ангидрида и окислов азота. Попадая в атмосферные слои, данные вещества подвергаются сложным фотохимическим превращениям. В результате окислительных реакций происходит их трансформация в высококонцентрированные кислотные соединения - серную и азотную кислоты. Этот процесс осуществляется через ряд промежуточных химических взаимодействий под влиянием атмосферных факторов.

4.5. Туманы

Подтвержден тот факт, что при формировании тумана увеличивается концентрация примесей на 40 - 110% по сравнению с ее концентрацией перед туманом.

Под фотохимическим туманом понимается комбинация смеси аэрозольных частиц и газов первичного и вторичного возникновения. Смог состоит из озона, серы, оксидов азота, множества органических соединений

пероксидной природы, которые в следствии приобрели название фотооксиданты.

Фотохимический смог проявляется в следствии фотохимических реакций, соблюдая при этом такие условия, как: присутствие огромной концентрации оксидов азота, углеводорода и др., отсутствие ветра или слабый воздухообмен в течении как минимум одного дня, наличие интенсивного солнечного света. Данные условия формируются с июня по сентябрь, в редких случаях в зимнюю пору. Когда погода долгое время ясная, солнечная радиация приводит к разрушению молекул диоксида азота с образованием оксида азота и атомарного кислорода.

Ледяной смог характерен для северных широт, образуется при температурах ниже -30°C , полном штиле, высокой влажности и наличии сильных источников загрязнения. На морозе капли водяного пара превращаются в мельчайшие кристаллы льда (размером 5-10 мкм) и повисают в воздухе в виде густого тумана, при этом природном явлении видимость уменьшается до 8-10 м. Частицы пылегазовых выбросов адсорбируются на поверхности ледяных кристаллов. Тяжесть кристаллов увеличивается, и они постепенно опускаются в наземный слой. Дыхание в таком тумане становится невозможным [13].

4.6. Ветер

На уровень атмосферного загрязнения исследуемого объекта существенное влияние оказывает ветровой режим. К ключевым факторам, определяющим это воздействие, относятся: особенности локальной циркуляции воздуха, расположение источников выбросов, влияние самих промышленных объектов на ветровую обстановку, а также комплексное взаимодействие этих элементов.

Главным параметром, регулирующим горизонтальное распространение загрязнений, выступает скорость ветра. Она определяет характер распределения выбросов как от низких, так и от высоких источников. При выбросах из высоких

труб промышленных предприятий наблюдается следующая закономерность: при сильном приземном ветре фиксируется повышенная концентрация примесей у поверхности. Это объясняется особенностями поведения перегретой газовой смеси, которая при выходе из трубы обладает повышенной плавучестью. В результате вокруг источника формируется зона вертикальных воздушных потоков, способствующая подъему загрязняющего факела и переносу примесей в верхние слои атмосферы. При слабом ветре наблюдается обратный эффект - снижение приземных концентраций благодаря более эффективному подъему выбросов.

По данным в Красноярске преобладают слабые ветры. За десятилетний период (2012-2022) среднегодовая скорость ветра составила 2,4 м/с, что соответствует легкому ветру по шкале Бофорта. Такие ветровые условия носят эпизодический характер. С экологической точки зрения наиболее неблагоприятными являются штили (отсутствие ветра) и слабые ветры со скоростью 1-3 м/с, так как они способствуют накоплению загрязняющих веществ в атмосфере [14].

5. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ГОРОДА НА КАЧЕСТВО ВОЗДУХА

5.1. Анализ динамики концентрации загрязняющих веществ

Ранее было указано, что метеопараметры непосредственно воздействуют на уровень загрязнения воздуха в определенном районе, устанавливая рассеивание, перенос и изменения веществ, которые загрязняют атмосферу.

Практической задачей данной работы является выявление закономерностей между ухудшением качества воздуха и метеорологическими параметрами. Для анализа использовались многолетние данные о метеорологических параметрах и сведения о веществах, влияющих на загрязнение воздуха в городе Красноярске за период с 2012 по 2022 год.

Для проведения углубленного исследования были созданы графики, отображающие за 11-летний период: максимальную частоту превышений ПДК и динамику метеорологических показателей в Красноярске, которые представлены далее.

Анализ данных таблицы 5.1 показывает динамику среднегодовых концентраций атмосферных загрязнений в исследуемом городе за 11-летний период. Наблюдения выявили следующие закономерности:

- концентрации оксида углерода и оксида азота оставались стабильными на протяжении всего периода;
- уровень диоксида азота колебался в пределах 1,0-1,3 ПДК с.с. в 2012, 2013 и 2021 годах;
- среднегодовые показатели взвешенных веществ варьировались от 1,0 до 1,9 ПДК с.с. в периоды 2012-2015 и 2021-2022[14].

Таблица 5.1 – Среднегодовые концентрации основных загрязняющих веществ в целом по Красноярску за период 2012-2022 (в единицах ПДК с.с.)

Год	Взвешенные вещества (пыль)	Оксид углерода	Диоксид азота	Оксид азота
2012	1,5	0,4	1,3	0,6
2013	1	0,4	1	0,5
2014	1,5	0,2	0,8	0,4
2015	1,9	0,3	0,7	0,4
2016	0,9	0,5	0,9	0,4
2017	0,8	0,4	0,8	0,3
2018	0,7	0,4	0,9	0,2
2019	0,6	0,5	0,8	0,1
2020	0,6	0,4	0,7	0,2
2021	1	0,4	1,2	0,3
2022	1,5	0,2	0,9	0,5

На рисунке 5.1 показан многолетний ход концентраций загрязняющих веществ атмосферного воздуха по данным отчетов «О состоянии загрязнения окружающей среды на территории Красноярского края» ФГБУ «Среднесибирское УГМС» с 2012 по 2022 год.



Рисунок 5.1 – График многолетнего хода среднегодовых концентраций основных загрязняющих веществ за период 2012 - 2022 в Красноярске

5.2. Анализ зависимости изменения концентраций загрязняющих веществ от скорости ветра

Проведена оценка зависимости концентраций загрязняющих веществ от скорости ветра. Анализ выполнялся на основе: среднегодовых показателей загрязнения за 11 лет, взятых из официального Обзора «О состоянии загрязнения объектов окружающей среды на территории Красноярского края, Республики Хакасии и Тыва»; расчетных данных о среднегодовой скорости ветра в Красноярске за 2012-2022, предоставленных метеостанцией Красноярск Опытное поле ФГБУ "Среднесибирское УГМС".

Естественно, ветер играет положительную роль в улучшении качества атмосферного воздуха, способствуя снижению уровня загрязнения. Однако в Красноярске преобладают слабые ветры (среднегодовая скорость 2,4 м/с), что приводит к накоплению вредных веществ в приземном слое атмосферы. Для оценки степени взаимосвязи между параметрами использовалась шкала Чеддока, которая показала следующие коэффициенты корреляции: скорость ветра и оксид углерода: -0,2 (обратная зависимость), скорость ветра и оксид азота: 0,4, скорость ветра и диоксид азота: 0,5, скорость ветра и взвешенные вещества: 0,4. Отрицательное значение коэффициента свидетельствует об обратной зависимости между скоростью ветра и концентрацией оксида углерода.

На рисунке 5.2 представлена среднегодовая динамика концентраций основных атмосферных загрязнителей и показателей скорости ветра за 11-летний период наблюдений.

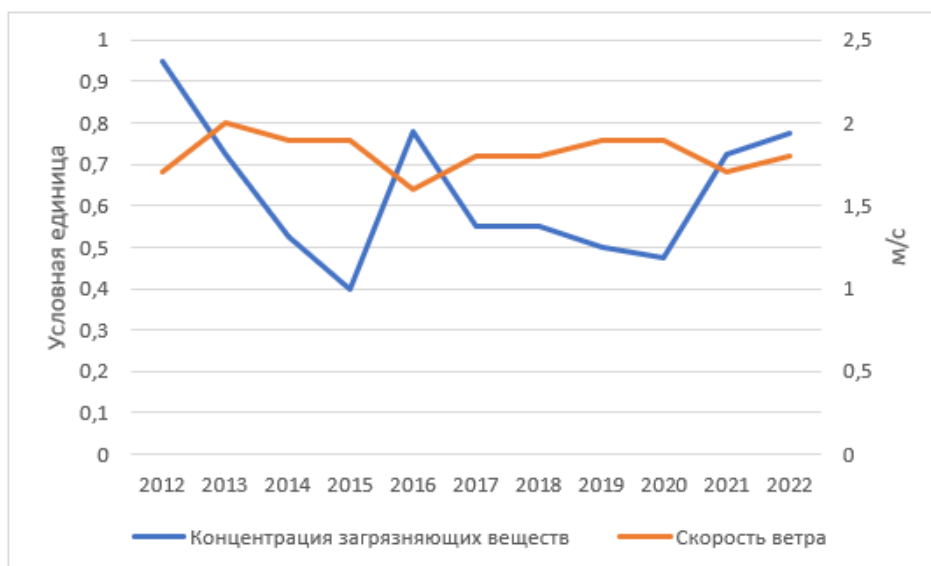


Рисунок 5.2 – График осредненного многолетнего хода среднегодовых концентраций основных загрязняющих веществ и скоростей ветра период 2012-2022 в Красноярске

5.3. Анализ зависимости изменения концентраций загрязняющих веществ от температуры воздуха

Для анализа использовались 11-летние среднегодовые показатели концентрации вредных веществ, которые были получены из Обзора «О состоянии загрязнения объектов окружающей среды на территории Красноярского края, Республики Хакасии и Тыва». Также произвели расчеты среднегодового значения температур в Красноярске, которые были получены из ежегодных данных о мониторинге окружающей среды за период 2012-2022 со станции Красноярск Опытное поле ФГБУ «Среднесибирское УГМС».

При высоких положительных температурах воздуха (свыше 25°C) наблюдаются химические реакции между атмосферными загрязнителями, приводящие к образованию новых вредных соединений. Такие процессы характерны преимущественно для летнего периода. Результаты корреляционного анализа показали слабую или отсутствующую взаимосвязь между исследуемыми параметрами, оцененную по шкале Чеддока: оксид углерода и температура: -0,1, оксид азота и температура: -0,2, диоксид азота и

температура: -0,2 и взвешенные вещества и температура: 0,2. Отрицательные значения коэффициентов свидетельствуют об обратной зависимости между температурой воздуха и концентрацией указанных загрязняющих веществ.

На рисунке 5.3 представлена среднегодовая динамика концентраций основных атмосферных загрязнителей и показателей температуры воздуха за 11-летний период наблюдений.

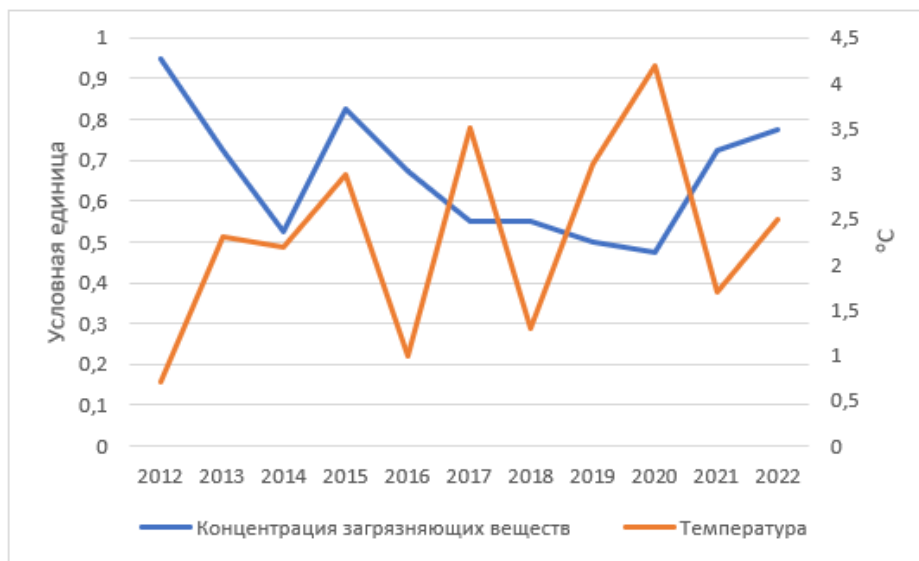


Рисунок 5.3 – График осредненного многолетнего хода среднегодовых концентраций основных загрязняющих веществ и температур воздуха за период 2012-2022 в Красноярске

5.4. Анализ зависимости изменения концентраций загрязняющих веществ от количества температурных инверсий

Для проведения анализа использовались среднегодовые значения концентраций вещества исследуемого города за 11 лет, которые были получены из Обзора «О состоянии загрязнения объектов окружающей среды на территории Красноярского края, Республики Хакасии и Тыва». Расчеты инверсий температуры были определены также за 11 лет. Данные были получены из ежегодных данных о мониторинге окружающей среды за период 2012-2022 со станции Красноярск Опытное поле ФГБУ «Среднесибирское УГМС».

Как отмечалось ранее, температурные инверсии создают в атмосфере задерживающие слои, способствующие накоплению водяного пара, пыли и ядер конденсации, что приводит к образованию дымки и тумана. Результаты исследования выявили умеренную корреляционную зависимость между отдельными параметрами. В таблице 5.2 приведены коэффициенты корреляции между среднегодовыми концентрациями загрязняющих веществ и показателями приземных/приподнятых инверсий, где: красные обозначения характеризуют слабую взаимосвязь, зеленые обозначения указывают на умеренную корреляцию не выделенные значения свидетельствуют об отсутствии связи

Таблица 5.2 – Коэффициенты корреляции при среднегодовых значениях концентраций загрязняющих веществ и среднегодовых значениях приземных и приподнятых инверсий

Загрязняющее вещество	PM10	CO	NO2	N2O
Приземные инверсии	0,3	0,4	0,2	0,2
Приподнятые инверсии	0,4	0,1	-0,01	0,5

На рисунках 5.4-5.5 представлены среднегодовые динамики концентраций основных атмосферных загрязнителей и показателей приземных и приподнятых инверсий за 11-летний период наблюдений.

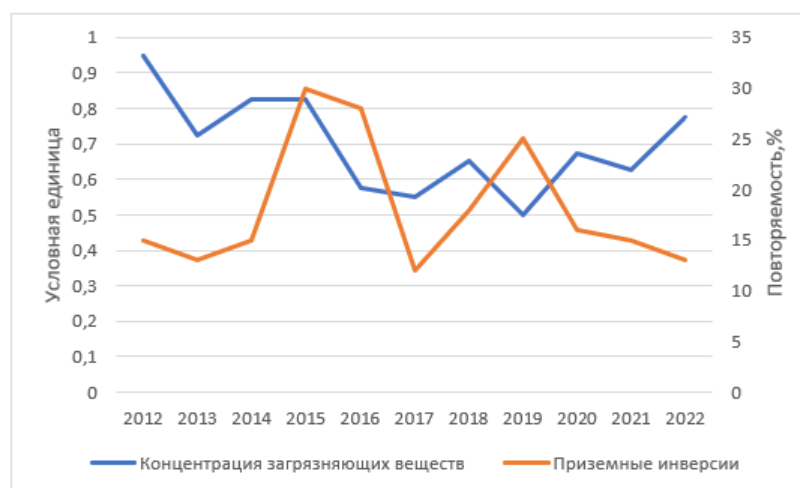


Рисунок 5.4 – График осредненного многолетнего хода среднегодовых концентраций основных загрязняющих веществ и количества приземных инверсий за период 2012-2022 в Красноярске

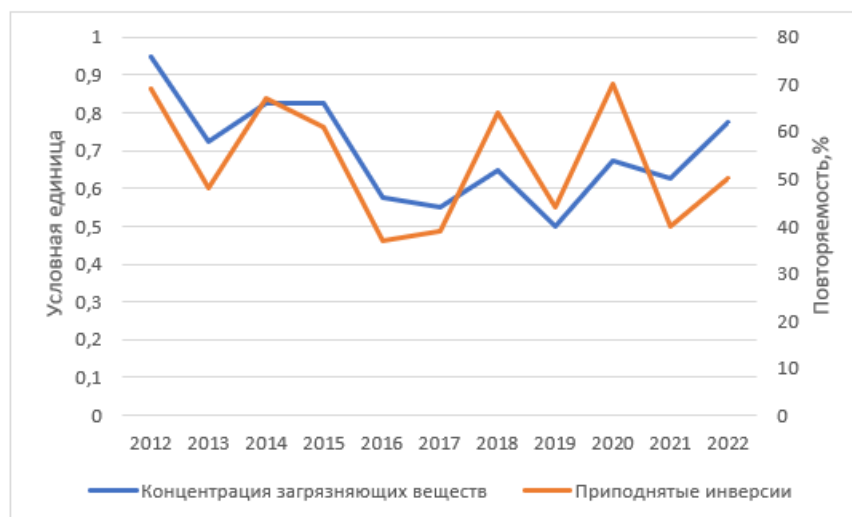


Рисунок 5.5 – График осредненного многолетнего хода среднегодовых концентраций основных загрязняющих веществ и количества приподнятых инверсий за период 2012-2022 в Красноярске

5.4. Анализ зависимости изменения концентраций загрязняющих веществ от количества осадков

Проведен анализ воздействия количества осадков на вещества, загрязняющие воздух. Для проведения анализа использовались среднегодовые значения концентраций вещества исследуемого города за 11 лет, которые были получены из Обзора «О состоянии загрязнения объектов окружающей среды на территории Красноярского края, Республики Хакасии и Тыва». Также произведены расчеты среднегодового количества осадков в Красноярске, которые были получены из ежегодных данных о мониторинге окружающей среды за период 2012-2022 со станции Красноярск Опытное поле ФГБУ «Среднесибирское УГМС».

Как отмечалось ранее, влияние атмосферных осадков на окружающую среду носит неоднозначный характер. С одной стороны, они способствуют очищению воздуха от загрязнений, с другой - могут приводить к кислотным

дождям, негативно воздействующим на почву. В условиях Красноярска осадки преимущественно выполняют очищающую функцию. Корреляционный анализ выявил следующие зависимости между среднегодовыми показателями:

- количество осадков и оксид углерода -0,04 (отсутствие значимой связи)
- количество осадков и оксид азота -0,4 (умеренная обратная корреляция)
- количество осадков и диоксид азота -0,6 (сильная обратная зависимость)
- количество осадков и взвешенные вещества -0,3 (умеренная обратная связь).

Все коэффициенты корреляции указывают на обратную зависимость параметров.

На рисунке 5.6 представлена среднегодовая динамика концентраций основных атмосферных загрязнителей и количество осадков за 11-летний период наблюдений.

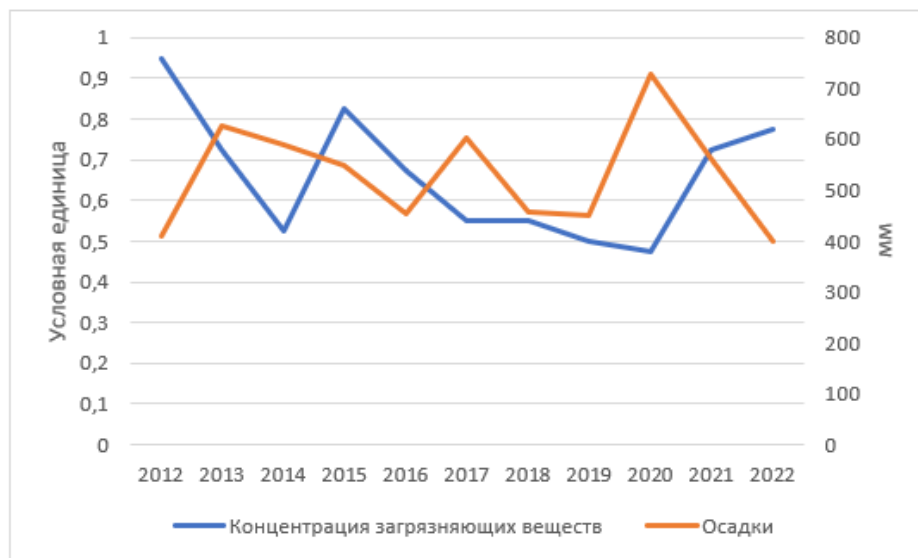


Рисунок 5.6 – График осредненного многолетнего хода среднегодовых концентраций основных загрязняющих веществ и количества осадков за период 2012-2022 в Красноярске

5.5. Анализ зависимости изменения концентраций загрязняющих веществ от количества туманов

Как было выявлено ранее, образование тумана приводит к значительному росту концентрации загрязняющих веществ. Корреляционный анализ выявил следующие взаимосвязи: оксид углерода и туманы: $-0,1$ (отсутствие значимой корреляции), оксид азота и туманы: $0,7$ (сильная прямая зависимость), диоксид азота и осадки: $0,4$ (умеренная положительная связь) и взвешенные вещества и туманы: $0,6$ (выраженная прямая корреляция)

На рисунке 5.7 представлена среднегодовая динамика концентраций основных атмосферных загрязнителей и число дней с туманами за 11-летний период наблюдений.

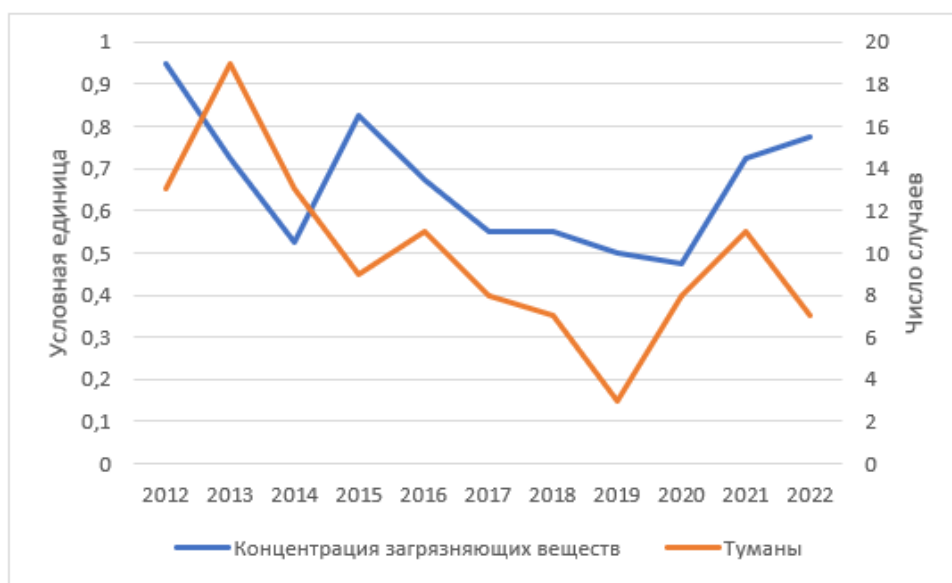


Рисунок 5.7 – График осредненного многолетнего хода среднегодовых концентраций основных загрязняющих веществ и количества туманов за период 2012-2022 в Красноярске

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования особенностей метеорологического режима Красноярска подтверждена резко континентальность климата города, проявляющаяся в значительной амплитуде колебания годовых температур с хорошо выраженным сезонным ходом, с уменьшением в зимние месяцы температуры до -40°C и увеличением в летний период до 30°C . Средняя годовая температура воздуха в Красноярске за 11 лет составляет $2,9^{\circ}\text{C}$. Среднесуточная максимум достигает в июле $18,4^{\circ}\text{C}$, а минимум в январе $-18,6^{\circ}\text{C}$. Для города характерны сезонные особенности в виде продолжительной зимы с устойчивым снежным покровом, коротким и достаточно жарким летом и быстро переходящими весной и осенью, с переменной погодой и с возможными заморозками в мае и сентябре.

Относительная влажность воздуха повторяет тенденцию годового количества осадков. Она демонстрирует сезонность с января по май относительная влажность достигает минимальное значение до 54%, а количество осадков 42-99 мм. В среднем за 11 лет максимум осадков выпадал в августе – 195 мм и в этом же месяце наблюдалось наибольшее значение относительной влажности 76%

Резкая континентальность климата Красноярска определяет хорошо выраженный годовой ход атмосферного давления за 11 лет с максимумом в холодный период года с ноября по февраль (1007), с минимумом в летние месяцы – июнь, июль (982 гПа).

Ветровой режим характеризуется стабильностью и свойственностью, обусловленными влиянием горного рельефа и рекой Енисей. Преобладают слабые ветры в течение года со скоростью 2 м/с с преобладающим западным и юго-западными направлениями за 11 лет в среднем 80%.

Исследованы основные атмосферные явления, характерные для Красноярска. Дымка(дым) наблюдается в течение всего года, максимальная повторяемость отмечается с декабря по февраль и это самое

повторяющееся явление, в среднем за год 177 дней. Гололедица тоже частое явление для данного города, наблюдается в переходные сезоны, когда суточная амплитуда температур неустойчива – 136 дней. Туманы в основном наблюдаются в зимний период, число дней в году с этим явлением 74. В летний период наблюдаются грозы за год бывает 29 дней. В зимний период характерны метели за год 22 дня.

В рамках исследования был выполнен сравнительный анализ многолетних метеорологических показателей и данных основных концентраций атмосферных загрязнителей, полученных на станции мониторинга Красноярск Опытное поле за период 2012-2022. Основное внимание уделялось таким показателям качества воздуха, как содержание оксидов азота, диоксид азота, оксид углерода и твердых взвешенных частиц. Методика исследования включала оценку влияния метеорологических параметров на состояние атмосферы посредством корреляционного анализа. Изучалась взаимосвязь между уровнем загрязнения и следующими метеопараметрами: скорость ветровых потоков, частота туманообразования, температурный режим, повторяемость инверсионных явлений (приземных и приподнятых) и объем атмосферных осадков.

Проведенное исследование позволило выявить существующие корреляционные связи между метеорологическими характеристиками и уровнем содержания вредных примесей в атмосфере. Анализ привел к следующим ключевым выводам:

1) Проведенный расчет выявили сильную корреляционную зависимость (0,7, прямая связь) между частотой туманообразования и уровнем атмосферного загрязнения. Наблюдения показывают, что в условиях Красноярска туманные явления отмечаются в среднем 73 дня в год (20% от общего количества), с максимальной повторяемостью в осенне-зимний период

2) Проведенное исследование демонстрируют сильную обратную зависимость (-0,6) между количеством атмосферных осадков и уровнем загрязнения воздуха. Многолетние данные свидетельствуют, что в Красноярске

осадки наблюдаются приблизительно в 106 днях ежегодно (29% от общего количества), что способствует улучшению состояния воздушной среды в теплый период

3) Проведенное исследование показало, что для высотных инверсионных слоев установлена статистически значимая положительная корреляция (0,5) с концентрацией загрязняющих веществ, что свидетельствует об их существенном влиянии на ухудшение качества воздуха. Приземные инверсии демонстрируют менее выраженную, но статистически умеренную зависимость с уровнем загрязнения (0,4, прямая связь)

4) Проведенное исследование выявили умеренную зависимость (0,5, прямая связь) между скоростью воздушных потоков и уровнем загрязнения атмосферы. В условиях Красноярска преобладают слабые ветра со среднегодовой скоростью около 2 м/с, что создает неблагоприятные условия для естественного очищения воздушного бассейна

5) Слабая зависимость загрязнения атмосферы Красноярска наблюдается от температурного режима (0,2, прямая связь).

Проведенный анализ демонстрирует перспективы применения результатов: совершенствование методов мониторинга качества атмосферного воздуха, развитие систем прогнозирования экологической обстановки, моделирование сценариев изменения воздушной среды и оптимизация мероприятий по снижению антропогенного воздействия. Полученные данные создают научную основу для последующих исследований взаимосвязи атмосферных процессов и качества городской среды, что особенно актуально в условиях наблюдаемых климатических изменений. Результаты позволяют разрабатывать более точные прогнозы и эффективные управленческие решения в области экологии мегаполиса.

В выпускной квалификационной работе задачи решены, а цели достигнуты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Администрация города Красноярска [Электронный ресурс]. <https://www.admkrsk.ru/city/areas/Pages/default.aspx> (дата обращения: 03.05.2025)
2. Безруких В. Физическая география Красноярского края. – Красноярск: Красноярское книжное издательство, 1994. – 112 с.
3. Михеева Е.Е., Михеев В.Е., Плющ И.В. Водные ресурсы Енисейского региона. – Красноярск, 2004. – 250 с.
4. Кобышева Н.В. Климат России. - СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 253 с.
5. История погоды [Электронный ресурс] WeatherArchive.ru (дата обращения: 24.05.2025)
6. Погода и климат в г. Красноярске [Электронный ресурс]. <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/29570.html> (дата обращения: 13.05.2025)
7. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы Гидрометеорологическое издательство, Ленинград, 2000, 548 с.
8. Климат Красноярска / [Подгот. Н. С. Богдановой, Н. В. Буриной, Г. А. Кругловой и др.]; под ред. Ц. А. Швер, А. С. Герасимовой. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. - 231 с.
9. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2022 году» — Красноярск, 2023.
10. Официальный сайт Министерства экологии и рационального природопользования Красноярского края [Электронный ресурс]. <http://www.mpr.krskstate.ru>. (дата обращения: 10.06.2025)
11. Вяткина К.С. Основные проблемы экологии в Красноярском крае / Ж.: E-Scio — ОН.: Политические науки — 2020.
12. ВГУИТ, Курс лекций по дисциплине «Экологический мониторинг» / ВГУИТ. — М.: Кафедра промышленной экологии. — Воронеж: 2007. — 8 с.
13. Метеорологические условия и загрязнение атмосферы: учебное пособие / А. Е. Морозов, Н. И. Стародубцева; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. – 128 с.

14. КГБУ ЦРМПиООС - Государственная система наблюдений за состоянием окружающей среды – КГБУ ЦРМПиООС Государственная система наблюдений за состоянием окружающей среды [Электронный ресурс].
<http://krasecology.ru/About/SUGMSReviews> (дата обращения: 12.06.2025)