

УДК 504.064:628.51:543.05:543.26
DOI 10.17513/use.38430

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРА, ВЛАЖНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА УРОВЕНЬ ЕГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Шишкин А.В., Кочетова Ж.Ю., Вартазарова А.Э.

*ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
Воронеж, e-mail: an_vartazarova@mail.ru*

Цель работы – изучение качества воздуха, взаимосвязи между концентрациями специфических загрязнителей и метеорологическими условиями на границе санитарно-защитной зоны химически опасного предприятия I класса опасности, расположенного в густонаселенном районе г. Воронежа. Объект исследования – двухлетняя динамика загрязнения атмосферного воздуха на границе санитарно-защитной зоны предприятия I класса опасности. Для оценки качества воздуха по шести приоритетным загрязнителям рассчитывали комплексный показатель – степень опасности загрязнения воздуха, учитывающий соотношение текущих и предельно допустимых концентраций загрязнителей и классы их опасности. Для установления направленности и тесноты связи между концентрациями индивидуальных загрязнителей и метеорологическими параметрами рассчитывали ранговые коэффициенты корреляции Спирмена. Установлено, что на границе санитарно-защитной зоны с подветренной стороны предприятия качество воздуха в 57 % случаев ранжируется как умеренное загрязнение атмосферы; в 23 % – опасное. Качество воздуха ухудшается в теплый период года за счет повышения концентраций бутадиена, стирола и формальдегида. В холодный период увеличиваются концентрации оксида углерода и твердых частиц на фоне снижения содержания в воздухе других загрязнителей. Значимые коэффициенты корреляции Спирмена установлены между содержанием загрязнителей и температурой, а также влажностью воздуха. Значимое влияние скорости ветра на концентрации загрязнителей воздуха не установлено, что объясняется высокой динамикой атмосферных процессов. В наблюдаемый двухлетний период основной вклад в загрязнение воздуха вносит бутадиен – соединение III класса опасности, канцероген. Содержание в воздухе формальдегида (II класс опасности, канцероген) повышается в летний период в несколько раз.

Ключевые слова: качество воздуха, метеорологические параметры, динамика загрязнения воздуха, бутадиен, стирол, толуол, оксид углерода, твердые частицы, формальдегид

THE INFLUENCE OF WIND SPEED, HUMIDITY AND AIR TEMPERATURE ON THE LEVEL OF POLLUTION

Shishkin A.V., Kochetova Zh.Yu., Vartazarova A.E.

*Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky
and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, e-mail: an_vartazarova@mail.ru*

The aim is to study air quality, the relationship between concentrations of specific pollutants and meteorological conditions at the border of the sanitary protection zone of a chemically hazardous enterprise of hazard class I located in a densely populated area of Voronezh. The object of the study is the two-year dynamics of atmospheric air pollution at the border of the sanitary protection zone of an enterprise of hazard class I. To assess air quality for six priority pollutants, a comprehensive indicator was calculated – the degree of danger of air pollution, taking into account the ratio of current and maximum permissible concentrations of pollutants and their hazard classes. To establish the direction and closeness of the relationship between the concentrations of individual pollutants and meteorological parameters, Spearman's rank correlation coefficients were calculated. It was found that at the border of the sanitary protection zone on the leeward side of the enterprise, air quality is rated as moderate atmospheric pollution in 57% of cases; in 23%, it is dangerous. Air quality deteriorates during the warmer months due to increased concentrations of butadiene, styrene and formaldehyde. During the cold period, concentrations of carbon monoxide and particulate matter increase against the background of a decrease in the content of other pollutants in the air. Significant Spearman correlation coefficients have been established between the content of pollutants and temperature, as well as air humidity. The significant effect of wind speed on the concentration of air pollutants has not been established, which is explained by the high dynamics of atmospheric processes. In the observed two-year period, the main contribution to air pollution is made by butadiene, a compound of hazard class III, a carcinogen. The formaldehyde content in the air (hazard class II, carcinogen) it increases several times in the summer.

Keywords: air quality, meteorological parameters, dynamics of air pollution, butadiene, styrene, toluene, solid particles, carbon monoxide, formaldehyde

Введение

Загрязнение воздуха в городах является серьезной экологической проблемой, которая обостряется год от года, несмотря на принимаемые усилия по очистке выбросов, образующихся при сжигании раз-

личного типа топлив, функционировании промышленных предприятий. По данным, опубликованным в Ежегоднике «Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2022 г.» в 205 городах с общей численностью населения 71,3 млн чел.

среднегодовая концентрация одного или нескольких загрязняющих веществ в воздухе кратно превышает безопасный уровень; в 129 городах уровень загрязнения воздуха комплексом загрязняющих веществ характеризуется как высокий и очень высокий. Хорошо известна прямая связь между качеством объектов окружающей среды и ростом сердечно-сосудистых, респираторных, онкологических, кожных заболеваний. Социальные потери из-за загрязнения воздуха в России достигают 100–140 тыс. преждевременных смертей в год, а экономический ущерб – от 1,9 до 4,9 % от валового внутреннего продукта [1–3]. Проблему усугубляет рост городского населения и, как следствие, изменения в землепользовании, что приводит к слиянию промышленных и селитебных зон [4].

Для снижения количества выбросов вредных веществ, негативно воздействующих на окружающую среду и человека, в России разработан Федеральный проект «Чистый воздух» (2021 г.). Для повышения эффективности контроля качества атмосферного воздуха применяют автоматизированные системы экологического мониторинга, которые осуществляют сбор информации и передачу ее на сервер. Наиболее часто производится мониторинг следующих параметров: оксид и диоксид азота (NO и NO_2), оксид углерода (CO), диоксид серы (SO_2), аммиак (NH_3), сероводород (H_2S), формальдегид (CH_2O), озон (O_3) и аэрозольные частицы (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$).

Приоритетом при выборе мест размещения передвижных и стационарных постов экологического мониторинга являются густонаселенные районы с неблагоприятной экологической обстановкой. Количество стационарных станций в городах должно зависеть от численности населения (от 1 до 16 постов). Отбор проб на них проводится ежедневно 3–4 раза в сутки с их последующим анализом в аккредитованных лабораториях. Многими авторами отмечается, что для надежной оценки качества воздуха количество этих постов недостаточно во многих городах РФ (за исключением Москвы, Санкт-Петербурга и нескольких других, участвующих в проекте «Чистый воздух») [5; 6]. Например, на территории промышленного города-миллионника Воронежа расположено всего 5 постов наблюдения за атмосферным воздухом (один – вблизи крупной магистрали, четыре – рядом с промышленными предприятиями в густонаселенных районах) [7].

Все большее распространение получают методы контроля атмосферного воздуха в населенных пунктах на основе спутниковых данных. Специалисты КБ «Стрелка» (г. Москва) в 2018 г. разработали систему для определения интегрального индекса загрязнения атмосферы TAQI (Tropomi Air Quality Index), которая является аналогом известных западных систем мониторинга. С помощью этих систем возможно выявлять очаги загрязнения атмосферного воздуха и определять концентрации некоторых приоритетных загрязнителей воздуха городов (CO , O_3 , PM и др.). Надо отметить, что точность определения концентраций веществ по спутниковым данным пока оставляет желать лучшего, она зависит от метеоусловий и на разных сайтах может отличаться в одно и то же время в десятки раз [8; 9]. Кроме того, такой подход не позволяет учитывать специфику выбросов различных промышленных предприятий.

Отдельную нишу экологического мониторинга атмосферного воздуха в населенных пунктах занимает производственный контроль. Территориальные органы Росприроднадзора и Росгидромета определяют перечень объектов мониторинга атмосферного воздуха, на которых необходимо осуществлять обязательный контроль уровня загрязнения объектов окружающей среды. Предметом наблюдения при этом могут быть стационарные и передвижные источники загрязнения атмосферного воздуха, приземного атмосферного слоя промышленных площадок, рабочих зон, воздуха на границе санитарно-защитных зон (СЗЗ). Параметры исследования различаются для каждого предприятия и зависят от специфики технологических процессов и фоновых показателей. Контроль основных загрязнителей на территории предприятий и на границе СЗЗ дает представление о реальном вкладе промышленного предприятия в загрязнение воздуха города, позволяет более точно оценить риски для населения, проживающего вблизи источников выбросов [10; 11, с. 9–10].

На качество воздуха городов большое влияние оказывают метеорологические условия. Хорошо известно их влияние на содержание и распространение приоритетных загрязнителей атмосферы городов (в основном оксидов, пыли) [7]. При этом флуктуации концентраций в воздухе специфических для отдельных предприятий загрязнителей изучены мало. Установление связи между динамикой загрязнения воздуха и изменением метеопараметров (скорость ветра,

температура и влажность воздуха) позволяет прогнозировать экологическую ситуацию на границе санитарно-защитных зон и принимать своевременные решения для снижения выбросов токсикантов при неблагоприятных метеорологических условиях.

Цель работы – изучение качества воздуха, взаимосвязи между концентрациями специфических загрязнителей воздуха и метеорологическими условиями на границе санитарно-защитной зоны химически опасного предприятия I класса опасности, расположенного в густонаселенном районе г. Воронежа.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – загрязнение атмосферного воздуха на границе СЗЗ акционерного общества «Воронежсинтезкаучук», расположенного в Левобережном районе г. Воронеж (рис. 1).

Для исследования загрязнения атмосферного воздуха на границе СЗЗ предприятия анализировали результаты контроля специфических загрязнителей в 2023 и 2024 гг. Для исследования влияния метеорологических условий на степень загрязнения атмосферы использовали архивные данные сайтов MeteoCast и Meteoblue.

Результаты исследования и их обсуждение

Город Воронеж располагается в пределах динамически активной структуры

Кривоборского прогиба шириной ~30 км на границе Среднерусской возвышенности и Окско-Донской равнины, что и определяет его рельеф. Окско-Донская равнина опускается со скоростью 5,5 мм в год, а Среднерусская возвышенность поднимается. Такое движение является причиной микросейсмических колебаний, на которые влияет наличие Воронежского водохранилища, разделяющего город, и развитая городская инфраструктура. Правый берег города находится на холмистом плато с абсолютными отметками от 100 до 160 м, а левый – в пониженной плоскоравнинной местности, которая постепенно переходит в речную террасу.

Левобережный район занимает юго-восточную часть города, в его составе находятся крупный микрорайон ВАИ, а также части районов Алексеевка, Песчанка, Красный Октябрь, с. Никольское, с. Таврово, п. Масловка. Количество населения по данным Управы Левобережного района на 2024 г. составляет 184,6 тыс. чел.

Левобережный район признан самым неблагоприятным по суммарному объему промышленных выбросов, на его долю приходится 36 % общего объема выбросов заводов и фабрик города [12, с. 16]. В выбросах АО «Воронежсинтезкаучук», достигающих более 700 т в год, содержатся токсичные органические вещества, в том числе I и II класса опасности [7].

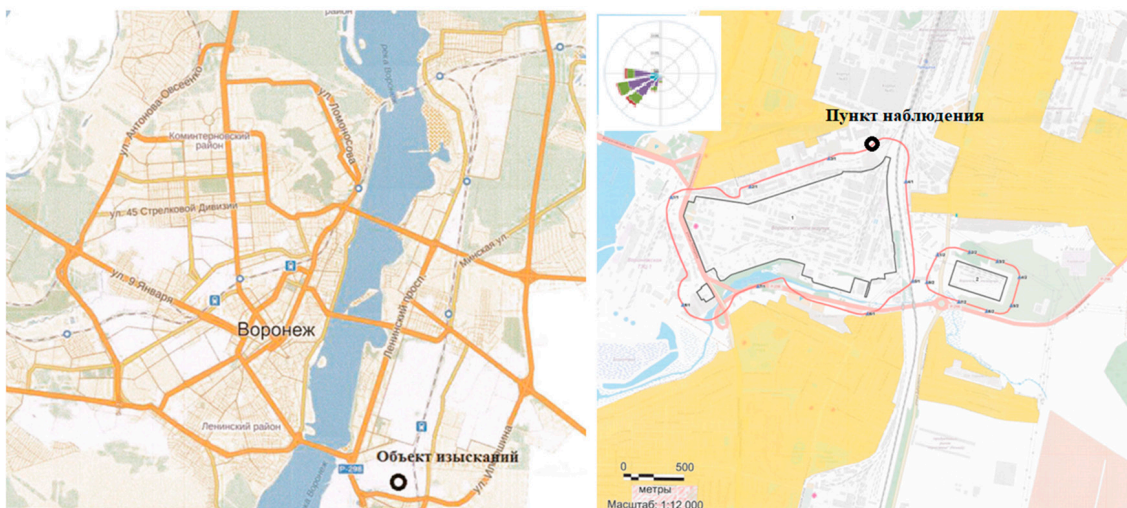


Рис. 1. АО «Воронежсинтезкаучук» в структуре г. Воронежа и расположение пункта экологического мониторинга в соответствии со среднегодовой розой ветров на границе санитарно-защитной зоны предприятия

Источник: составлено авторами на основе данных поисково-информационной картографической службы Яндекса ([Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/maps/193/voronezh/> (дата обращения: 05.09.2025)

Таблица 1

Некоторые характеристики основных загрязнителей воздуха
на границе санитарно-защитной зоны АО «Воронежсинтезкаучук» [13; 14]

Загрязнитель	ПДК _{сс} , мг/м ³	Класс опасности	P, %	Последствия длительного воздействия на организм человека
1,3-Бутадиен (C ₄ H ₆)	0,02	III	79	Респираторные заболевания, онкогенный риск, нейротоксическое действие, заболевания кожи и желудочно-кишечного тракта
Стирол (этилбензол C ₈ H ₁₀)	0,02*	III	22	Хронические заболевания крови, печени, желудочно-кишечного тракта, расстройства нервной системы, онкогенный риск
Толуол (метилбензол C ₇ H ₈)	0,5*	III	24	Поражение легких, кожи, почек, печени, тяжелые сердечные реакции, изменение состава крови, разрушение костной ткани
Оксид углерода (CO)	3,0	IV	35	Заболевания центральной нервной, иммунной, эндокринной, половой, сердечно-сосудистой систем
Взвешенные частицы (РМ, суммарно)	0,035	III	98	Воздействие на сердечно-сосудистую и центральную нервную системы, органы дыхания, неврологические эффекты у взрослых (уменьшение объема мозга, снижение когнитивных функций, деменция), повышаются риски развития диабета и рака легких
Формальдегид (ФА) (CH ₂ O)	0,01	II	20	Развитие респираторных, онкологических, неврологических, заболеваний, аллергических реакций

Примечание. * ПДК_{сс} не указаны в [13], значения рассчитаны по формуле $\text{ПДК}_{\text{сс}} = \text{ПДК}_{\text{мр}}^{0,6} \cdot \text{ПДК}_{\text{ст}}^{0,4}$ [15].

Согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов», промышленные площадки АО относятся к предприятиям I класса опасности с ориентировочным размером санитарно-защитной зоны, равным 1000 м. Нормируемые объекты (в основном жилые дома малой и средней этажности) расположены от контура СЗЗ на расстоянии от 65 м (рис. 1, желтая зона).

Для исследования загрязнения атмосферного воздуха на границе СЗЗ предприятия анализировали результаты контроля специфических загрязнителей в 2023 и 2024 гг., выполненного на пункте наблюдения, который расположен на северо-восточной границе контура в соответствии с преобладающими направлениями ветра в течение года (рис. 1, роза ветров). Пробы на пункте наблюдения отбираются 2–4 раза в течение дня на высоте 2 и 4 м, а затем анализируются в независимой аккредитованной лаборатории. Некоторые результаты ежедневных исследований качества атмосферного воздуха есть в открытом доступе на официальном сайте предприятия. К веществам, подлежащим обязательному контролю на границе СЗЗ предприятия, относятся бутадиен, стирол, толуол, циклогексан, аммиак, диоксид

азота, оксид углерода, твердые частицы (РМ), бутилен, формальдегид (ФА) и этилмеркаптан. Для расчета интегрального показателя загрязнения атмосферы из этого перечня брали только те вещества, концентрации которых имеют высокую повторяемость превышения установленных для населенных пунктов нормативов ($P \geq 20\%$). Предельно допустимые концентрации в атмосферном воздухе городских и сельских поселений (среднесуточные ПДК_{сс}), классы опасности, средняя за 2 года кратность превышения среднесуточных фактических C_i предельно допустимых концентраций и воздействие на организм человека загрязнителей представлены в табл. 1.

Для оценки степени опасности загрязнения атмосферы рассчитывали интегральный показатель Q_n (для $n = 6$ загрязняющих веществ), который учитывает концентрации вредных веществ в воздухе и степень их воздействия на организм человека [16, с. 6]:

$$Q_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n K_{oi}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{k_i C_i}{\text{ПДК}_i}}, \quad (1)$$

где K_{oi} – коэффициент опасности i -го загрязнителя; k_i – коэффициент изоэффективности, зависящий от класса опасности i -го вещества (для I класса $k = 2,0$; II – 1,5; III – 1,0;

IV – 0,8). В отличие от распространенного индекса загрязнения атмосферы (ИЗА), учитывающего вклад пяти загрязнителей, этот показатель позволяет оценивать комплексное загрязнение воздуха для различного количества веществ (от 2 до 20 и более). Для шести загрязняющих веществ шкала степени опасности загрязнения атмосферы включает ранги: I) $Q \leq 1,9$ – допустимое загрязнение атмосферы; II) $2,0 \leq Q \leq 3,0$ – слабое; III) $3,1 \leq Q \leq 6,0$ – умеренное; IV) $6,1 \leq Q \leq 12,0$ – сильное; V) $Q \geq 12,1$ – опасное.

Для исследования влияния метеорологических условий на степень загрязнения атмосферы использовали архивные дан-

ные сайтов MeteoCast и Meteoblue. Среднемесячная повторяемость направления ветра в г. Воронеже показана на рис. 2. Преобладающее направление – юго-западное (реже западное), что на данном этапе работы позволило исследовать показания загрязнения атмосферы одного пункта наблюдения, расположенного с подветренной стороны предприятия (рис. 1). Минимальная за два исследуемых года скорость ветра составляла 0,34 м/с (февраль); максимальная – 10,66 м/с (ноябрь); среднее значение – 4,22 м/с. В холодный период (ноябрь – февраль) скорость ветра достигает 8 м/с и более.

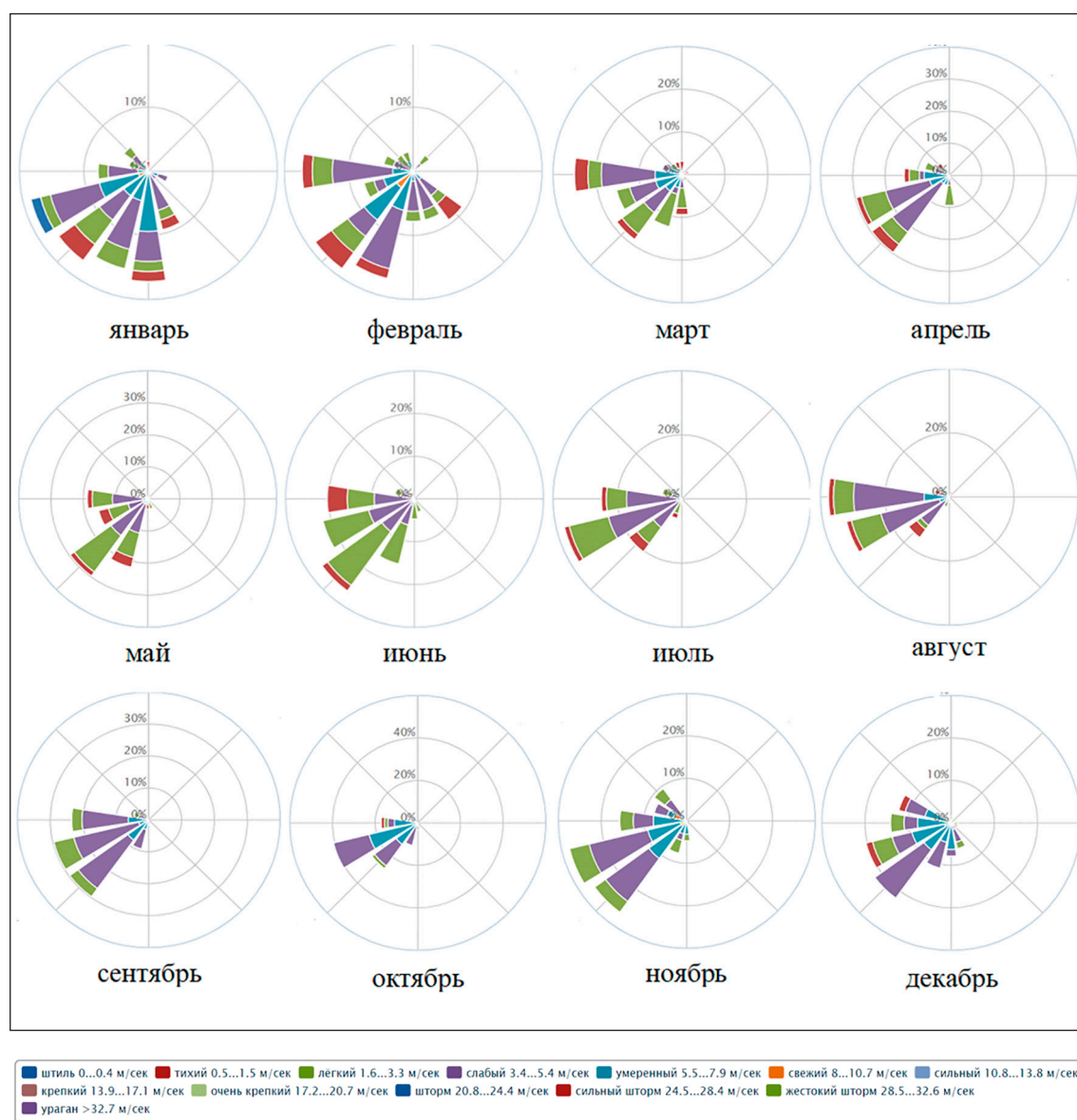


Рис. 2. Роза ветров в г. Воронеже.

Источник: составлено авторами по данным сайтов MeteoCast и Meteoblue

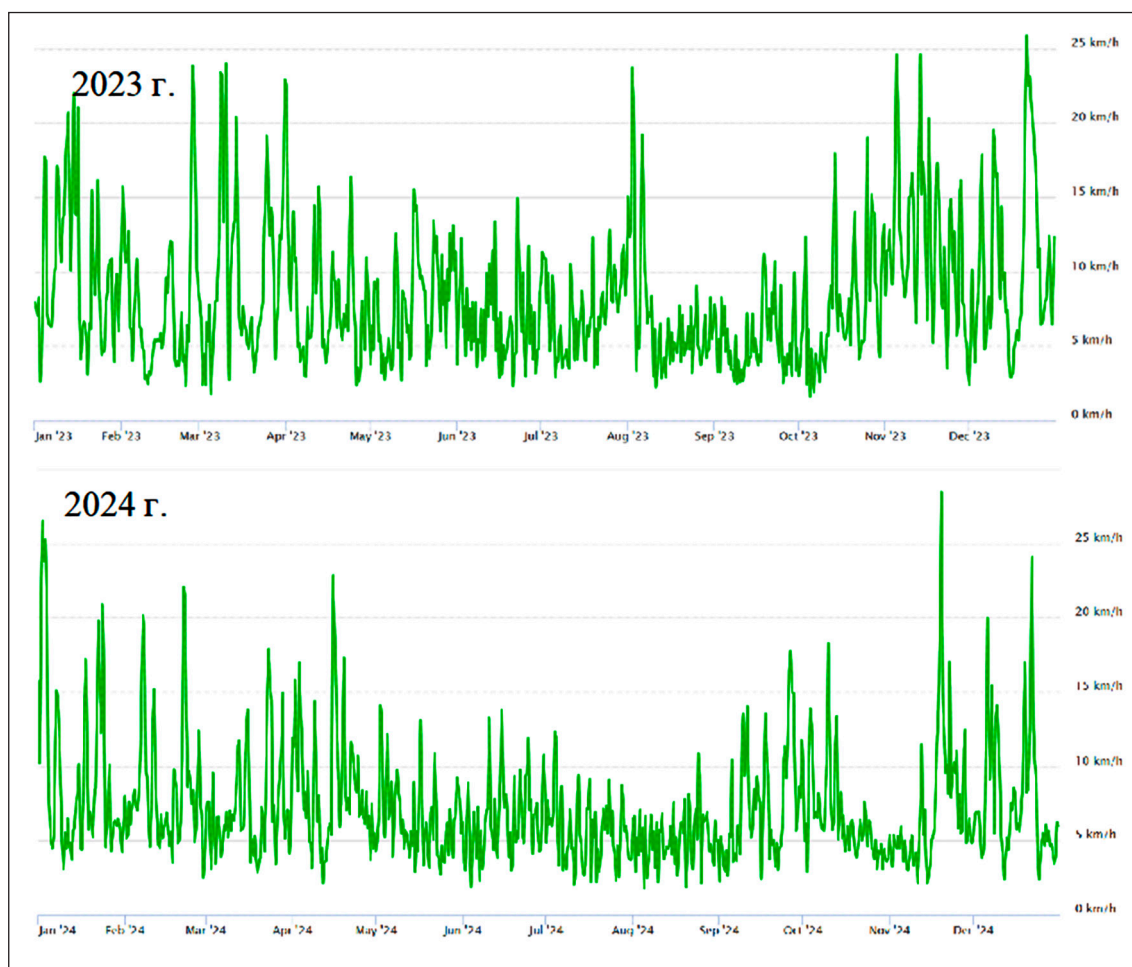


Рис. 3. Изменение скорости ветра (м/с) в г. Воронеже
 Источник: составлено авторами по данным сайтов MeteoCast и Meteoblue

В теплые месяцы (май – сентябрь) она не превышает 6,7 м/с. Дни со штилем, когда пониженный турбулентный обмен снижает рассеивание низких выбросов и увеличивает поступление в приземный слой высоких выбросов, наблюдается в летний период. Однако это явление может наблюдаться и зимой, когда при ослаблении ветра до штиля происходит подъем перегретых выбросов от отдельных высоких источников в верхние слои атмосферы, где они рассеиваются. Если при этих условиях наблюдается инверсия, которая образует «потолок», препятствующий подъему выбросов, то концентрация загрязняющих веществ в приземном слое возрастает [17]. Изменение скорости ветра за исследуемый период представлено на рис. 3.

Воронеж расположен в зоне умеренного климата. Зима умеренно морозная, имеется устойчивый снежный покров, который в последние годы образуется в начале или сере-

дине декабря. Зимой часто бывают оттепели, которые могут сопровождаться дождем (особенно в декабре). В то же время бывают и заморозки с температурами ниже -20°C , которые длятся неделю и более. Весна начинается во второй половине марта, в апреле температура может достигать $+20^{\circ}\text{C}$ (как это было в наблюдаемый период), но в любой день может похолодать и пойти снег. Заморозки могут быть и в мае, но к концу месяца устанавливается теплая летняя погода, когда столбики термометров поднимаются до $+30^{\circ}\text{C}$. Летние месяцы, а последнее время и начало сентября, теплые и жаркие. Самые высокие температуры фиксируются в июле и августе ($30\text{--}35^{\circ}\text{C}$ и выше), в сентябре температура воздуха также может достигать $25\text{--}30^{\circ}\text{C}$. Надо отметить, что по данным сайта Gismeteo.ru, 2024 г. в Воронеже стал вторым самым теплым годом в истории метеонаблюдений (средняя температура составила $+9,2^{\circ}\text{C}$).

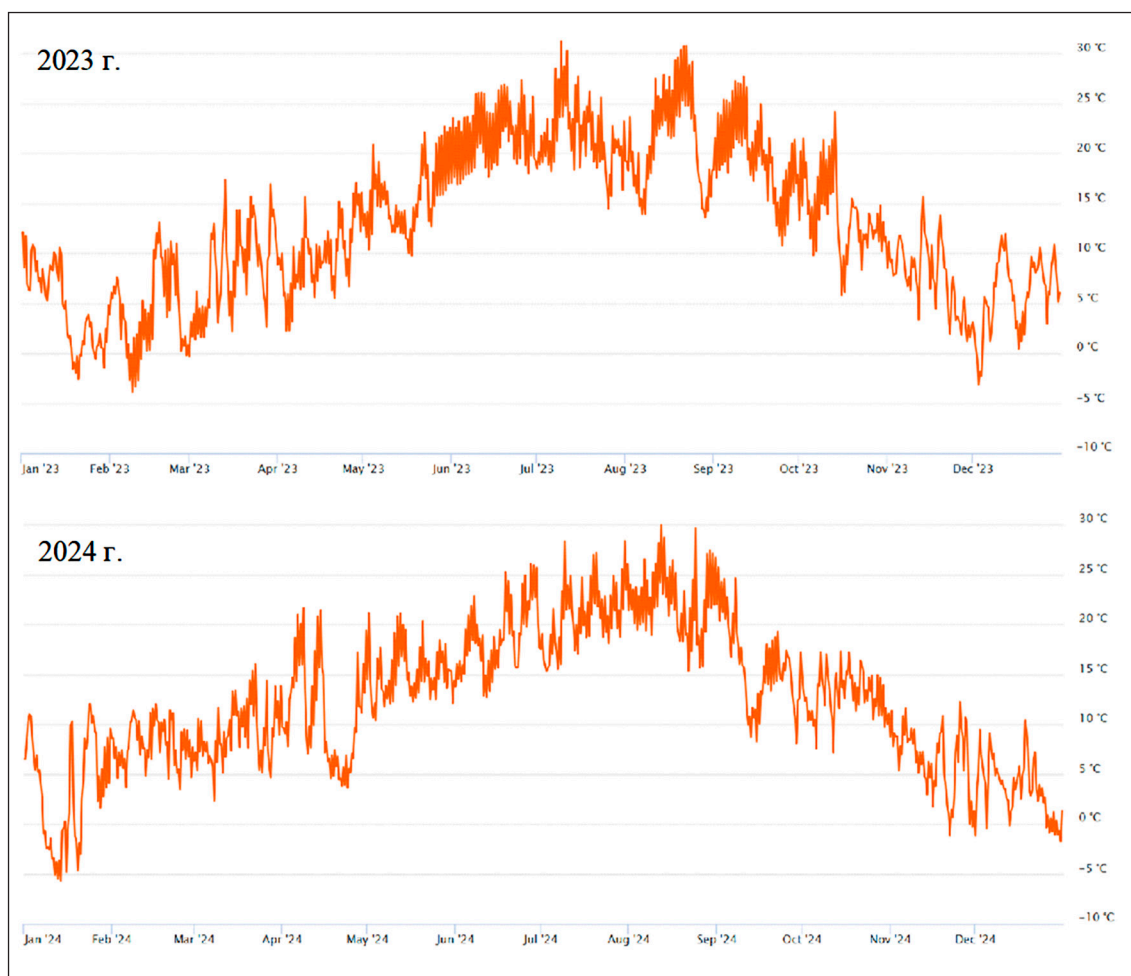


Рис. 4. Температурный режим (°C) в г. Воронеже
Источник: составлено авторами по данным сайтов MeteoCast и Meteoblue

Погода может быть и дождливой, и засушливой, что обусловлено формированием антициклона. Воронежа могут достигать жаркие воздушные массы из Казахстана и Северной Африки. В этом случае дневная температура может быть более +35°C. Температурный режим и количество осадков в городе за наблюдаемый период показаны на рис. 4 и 5.

Для оценки тесноты и направленности корреляционной связи между двумя признаками (концентрацией загрязнителя и метеопараметром) рассчитывали коэффициент ранговой корреляции Спирмена R_s :

$$R_s = 1 - \frac{6(\sum d_j^2)}{m(m^2 - 1)}, \quad (2)$$

где d_j – разность между двумя рангами каждого наблюдения; m – количество наблюдений.

Статистическая значимость R_s оценивается по t-критерию Стьюдента. При уровне значимости $p = 0,05$ и количеству измерений в выборке $m = 104$ (~ каждый 7-й день в году) критическое значение коэффициента составляет 1,96. При использовании коэффициента ранговой корреляции условно оценивали силу связи между признаками, считая значения $R_s \geq 0,39$ показателями слабой тесноты связи; $0,50 < R_s < 0,80$ – средней; $R_s \geq 0,80$ – высокой.

На первом этапе рассчитывали степень опасности загрязнения атмосферы Q_n по шести приоритетным загрязнителям (1). Динамика степени опасности загрязнения атмосферного воздуха в пункте наблюдения на границе СЗЗ приведена на рис. 6.

Опасное загрязнение атмосферы за 2 года наблюдений не выявлено; на долю сильной степени загрязнения (ранг IV) приходится 23 % случаев. Допустимый уровень

загрязнения (ранг I) зафиксирован в 8 случаях из 104; минимальная степень загрязнения $Q_n = 1,4$ (ноябрь, 2023 г.); максимальная $Q_n = 6,6$ (июнь, 2024 г.). Наиболее часто повторяющиеся значения степени опасности загрязнения воздуха принадлежат интервалу 3,48–5,55, что соответствует умеренному уровню загрязнения воздуха (ранг III). Функция распределения Q_n представлена на рис. 7.

Рассчитанные интегральные критерии оценки качества воздуха Q_n мало зависят от метеорологических условий, однако вклад индивидуальных загрязнителей в этот показатель подвержен значительным колебаниям в зависимости от сезона. Для учета вклада индивидуальных загрязняющих веществ в суммарный показатель и визуализации качества воздуха предложено использовать лепестковые диаграммы. На них по радиальным осям откладываются коэффициенты опасности загрязнителей $(K_{oi})^{1/2}$, а площадь самой диаграммы пропорциональна Q_n (1). В качестве примера на рис. 8

показано изменение качества воздуха, усредненное для различных месяцев года.

Из диаграмм следует, что суммарное загрязнение воздуха в летний месяц выше, чем в зимний. При этом значительно увеличивается вклад бутадиена и формальдегида; в меньшей степени – стирола, толуола, твердых частиц. Вклад оксида углерода в суммарный показатель качества воздуха в теплый месяц года снижается, что согласуется с известными данными [2; 7]. Вклад бутадиена в загрязнение воздуха на границе СЗЗ АО «Воронежсинтезкаучук» во все периоды года является наибольшим по сравнению с другими исследуемыми веществами.

Для определения влияния различных метеопараметров на поведение индивидуальных загрязнителей в воздухе рассчитывали коэффициенты корреляции Спирмена (2) между усредненными по дням концентрациями приоритетных загрязнителей и усредненными по дням параметрами, указанными на рис. 3–5. Результаты расчетов в табл. 2.



Рис. 5. Относительная влажность (% относ.) в г. Воронеже
Источник: составлено авторами по данным сайтов MeteoCast и Meteoblue

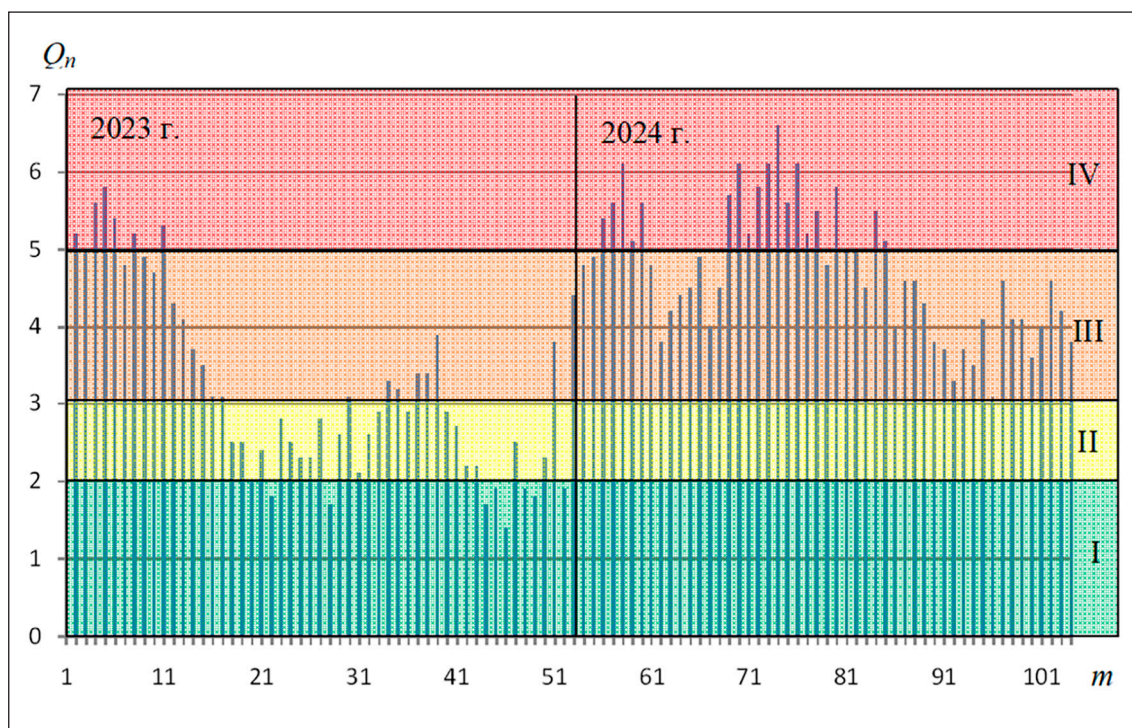


Рис. 6. Динамика степени опасности загрязнения атмосферного воздуха
Источник: составлено авторами на основании проведенных расчетов

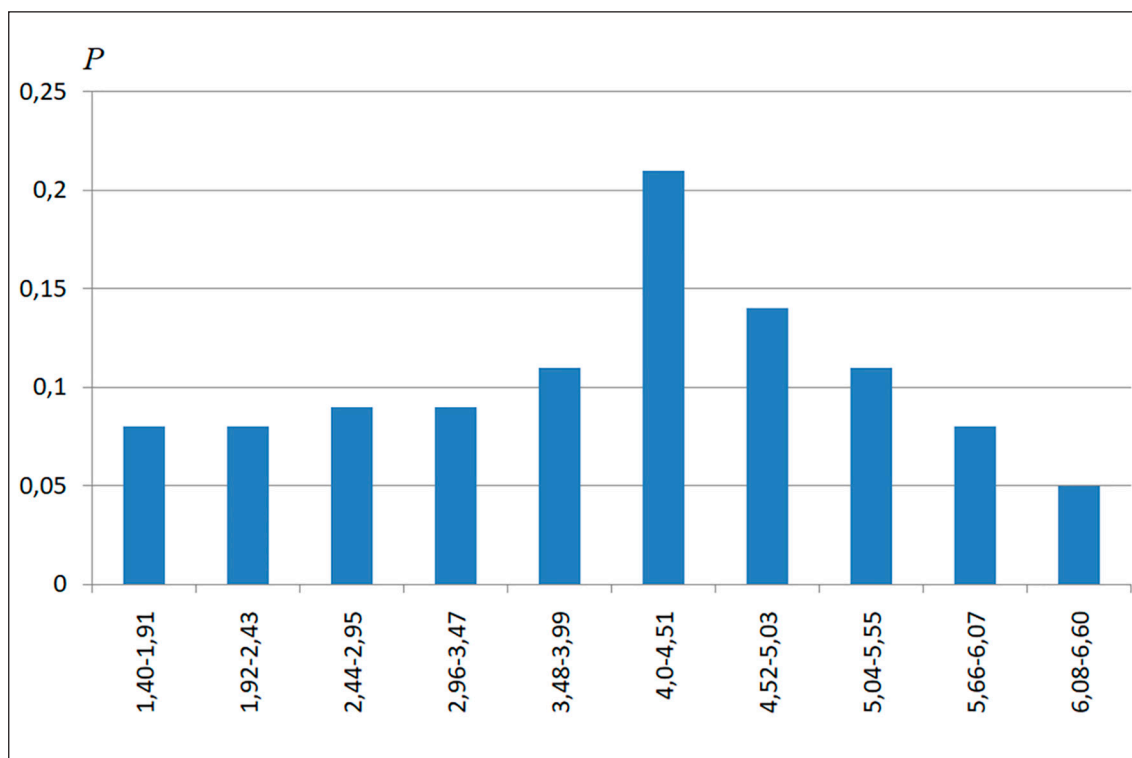


Рис. 7. Распределение степени опасности загрязнения атмосферного воздуха
Источник: составлено авторами на основании проведенных расчетов

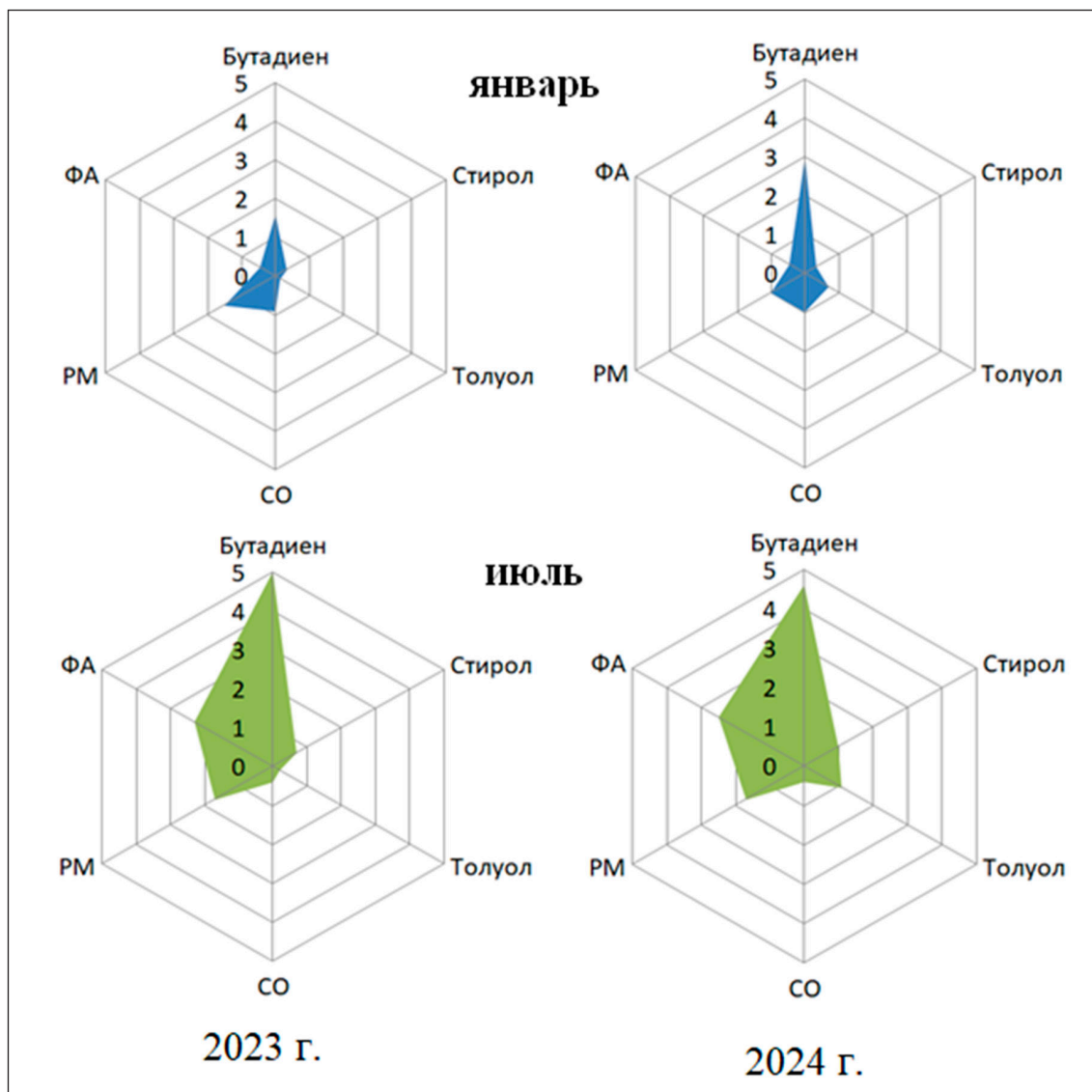


Рис. 8. Визуализация степени опасности загрязнения воздуха и вклада индивидуальных загрязнителей
 Источник: составлено авторами на основании проведенных расчетов

Таблица 2

Теснота и направленность связи между концентрациями приоритетных загрязнителей воздуха и метеопараметрами ($m = 104$, $p = 0,05$)

Загрязнитель воздуха	Коэффициент корреляции Спирмена, R_s		
	Скорость ветра, м/с	Температура воздуха, °C	Влажность воздуха, % относит.
1,3-Бутадиен	-0,19	+0,56	+0,40
Стирол	-0,29	+0,40	+0,21
Толуол	-0,35	+0,34	+0,14
Оксид углерода	-0,32	-0,41	+0,28
PM	-0,29	-0,39	+0,31
Формальдегид	-0,34	+0,44	+0,44

Источник: составлено авторами на основании проведенных расчетов.

Значимой тесноты связи между содержанием загрязнителей воздуха и скоростью ветра не установлено. Это объясняется изменчивостью скорости воздуха в течение коротких промежутков времени и тем, что для расчетов использовали не одновременно измеренные сравниваемые параметры, а их усредненные за сутки значения. Однако наблюдается устойчивый тренд отрицательных значений R_s , то есть с увеличением скорости ветра концентрации всех компонентов уменьшаются.

Менее подвержена колебаниям среднесуточная температура воздуха. Слабая положительная теснота связи установлена между температурой и концентрациями стирола и формальдегида; связь средней силы – бутадиена. Отрицательная значимая сила связи характерна для оксида углерода и твердых частиц, что объясняется интенсивным выбросом этих компонентов в холодный период в связи с отопительным сезоном в городе и ростом фоновых загрязнений воздуха.

Повышение влажности воздуха приводит, как правило, к повышению загрязнения воздуха индивидуальными веществами (для бутадиена, формальдегида $R_s > 0,39$). Влажность воздуха удерживает загрязнители вблизи земли, не давая им рассеяться в атмосфере. Это приводит к увеличению загрязнения приземного атмосферного слоя воздуха. При этом для оксида углерода и твердых частиц характерны обратные зависимости, что связано с сезонными колебаниями концентраций, описанными выше.

Заключение

Установлены приоритетные загрязнители атмосферного воздуха на границе СЗЗ предприятия I класса опасности, повторяемость превышения ПДК которых за 2 года наблюдений составила $> 20\%$. К ним относятся бутадиен, стирол, толуол, оксид углерода, РМ, формальдегид. Рассчитана степень опасности загрязнения воздуха как сумма коэффициентов опасности приоритетных загрязнителей. На долю сильной степени загрязнения воздуха приходится 23 % случаев; в основном качество воздуха на границе СЗЗ с подветренной стороны предприятия характеризуется как умеренное.

Отмечается, что в теплые месяцы года качество воздуха хуже, чем в холодные, несмотря на снижение концентраций основных загрязнителей – СО и РМ. Предложена визуализация качества воздуха в виде

лепестковых диаграмм, отражающих вклад в интегральный показатель индивидуальных загрязнителей с учетом классов их опасности. Установлено, что в холодный период растут концентрации СО и РМ, а в теплый – выше концентрации бутадиена, стирола и формальдегида.

Подтверждено влияние метеопараметров на концентрацию загрязнителей в приземном слое атмосферы. Установлены значимые положительные ранговые коэффициенты корреляции между температурой и концентрациями бутадиена, стирола, формальдегида; отрицательные – твердыми частицами и СО. Между влажностью воздуха и концентрациями бутадиена и формальдегида установлены положительные корреляционные зависимости слабой силы.

Список литературы

1. Канина А.Р. Влияние загрязненного воздуха на здоровье человека // The Scientific Heritage. 2021. № 78–2. С. 15–16. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-zagryaznennogo-vozduha-na-zdorovie-cheloveka> (дата обращения: 17.06.2025).
2. Куролап С.А., Клепиков О.В., Кульнев В.В., Кизеев А.Н., Сюрин С.А., Енин А.В. Канцерогенный риск, связанный с загрязнением атмосферного воздуха промышленных городов Центрального Черноземья // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102. № 8. С. 853–860. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-8-853-860.
3. Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Бакланов И.О., Маслова Н.В. Влияние загрязнения почв объектов авиационной и космической деятельности на здоровье человека // Экология промышленного производства. 2020. № 4 (112). С. 39–44. URL: http://izdat.ntkompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=158;ELEMENT_ID=20512&ELEMENT_ID=25720 (дата обращения: 17.06.2025).
4. Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Тимошинов О.В. Исследование загрязнения атмосферного воздуха, снежного покрова и поверхностных вод в экологически неблагоприятном районе Воронежа // Успехи современного естествознания. 2017. № 12. С. 158–163. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36623> (дата обращения: 17.06.2025).
5. Панарин В.М., Маслова А.А., Гришаков К.В. Обзор станций автоматического мониторинга загрязнения атмосферного воздуха // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 7. С. 69–75. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-7-69-75.
6. Бобылев С.Н., Соловьева С.В., Астапкович М. Качество воздуха как приоритет для новой экономики // Мир новой экономики. 2022. Т. 16. № 2. С. 76–88. DOI: 10.26794/2220-6469-2022-16-2-76-88.
7. Акимов Л.М., Акимов Е.Л. Сезонная динамика и пространственное распределение концентраций антропогенных загрязнителей в воздухе г. Воронеж // Региональные геосистемы. 2021. № 45 (4). С. 545–557. DOI: 10.52575/2712-7443-2021-45-4-545-557.
8. Зуев Д.В., Кашкин В.Б., Симонов К.В. Использование спутниковых методов мониторинга для оценки экологического состояния северных территорий Красноярского края // Успехи современного естествознания. 2018. № 2. С. 86–92. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36677> (дата обращения: 17.06.2025).
9. Holloway T., Miller D., Anenberg S. et al. Satellite Monitoring for Air Quality and Health // Annu Rev Biomed Data Sci. 2021. Jul 20. № 4. P. 417–447. DOI: 10.1146/annurev-biodatasci-110920-093120.

10. Май И.В., Балашов С.Ю. Научно-методическое обоснование программы производственного контроля качества атмосферного воздуха на границе единой санитарно-защитной зоны промышленного узла (опыт Пермского края) // Медицина труда и промышленная экология. 2013. № 11. С. 42–47. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nauchno-metodicheskoe-obosnovanie-programmy-proizvodstvennogo-kontrolya-kachestva-atmosfernogo-vozduha-na-granitse-edinoy-sanitarno> (дата обращения: 17.06.2025).
11. Кочетова Ж.Ю., Маслова Н.В., Базарский О.В. Авиационно-ракетные кластеры и окружающая среда. Серия: Научная мысль. М.: Инфра-М, 2022. 266 с. ISBN 978-5-16-017033-6.
12. Куролап С.А., Прожорина Т.И., Клевцова М.А. Медико-экологический атлас города Воронежа. Русское географическое общество, Воронежский государственный университет, Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2019. 100 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vsu.ru/ru/publishing/nprvu/2019/201901/2019-01-02.pdf> (дата обращения: 17.06.2025). ISBN 978-5-87456-883-2.
13. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания, 2021. URL: https://ds278-krasnoyarsk-r04.gosweb.gosuslugi.ru/netcat_files/19/8/SP123685_21_0.pdf (дата обращения: 17.06.2025).
14. Показатели опасности веществ и материалов в 5 т. Справочник / Под общ. ред. В.К. Гусева. М.: Фонд им. И.Д. Сытина, 1999–2006. [Электронный ресурс]. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_000844346/ (дата обращения: 17.06.2025). ISBN 5-86863-102-1.
15. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 6 июня 2017 г. № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе».
16. Марцуль В.Н., Капорилов В.П., Головач А.М. Экология и контроль состояния окружающей среды. Минск: БГТУ, 2009. 95 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/29160> (дата обращения: 17.06.2025). ISBN 978-985-434-911-4.
17. Назарчук О.В. Исследование процесса загрязнения атмосферы карьерного пространства от точечных стационарных источников в условиях температурной инверсии и штиля // Проблемы недропользования. 2021. № 4 (31). С. 97–104. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.04.097.