

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.5

Влияние метеорологических условий на уровень загрязнения атмосферного воздуха в городе Уфе

Д.Ю. Васильев^{✉ 1, 2, 3}, П.В. Вельмовский³, В.А. Семенов^{2, 4},
Г.Н. Семенова⁵, А.А. Чибилев^{2*}

¹Уфимский государственный авиационный технический университет
450077, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

³Институт степи ОФИЦ УрО РАН
460000, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11

⁴Институт географии РАН
119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29

⁵Башкирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
450049, г. Уфа, ул. Р. Зорге, 25/2

Поступила в редакцию 25.08.2022 г.;
после доработки 6.10.2022 г.;
принята к печати 9.12.2022 г.

Приводятся результаты анализа качества атмосферного воздуха в г. Уфе с 2017 по 2020 г. Рассматривается влияние метеорологических факторов на уровень загрязнения в указанный период. Базой для анализа послужили инструментальные измерения на девяти станциях государственной наблюдательной сети Росгидромета. Вычислены ежедневные значения параметра загрязнения атмосферы. Определены тенденции в изменении уровня загрязнения атмосферы различными примесями. Методом вейвлет-преобразований установлены характеристичные периоды в колебаниях уровня загрязнения. С помощью кросс-вейвлет-анализа выявлены связи уровня загрязнения воздуха с основными метеорологическими параметрами атмосферы. В 2017–2020 гг. средние концентрации диоксида серы, ксилолов, толуола увеличились. Высокий уровень загрязнения атмосферы наблюдается при штилях, слабых ветрах и температурных инверсиях. Наблюдаемые изменения загрязнения городской атмосферы позволяют оценить влияние различных антропогенных факторов на качественный состав атмосферного воздуха.

Ключевые слова: загрязнение воздуха, качество воздуха, температура воздуха, атмосферное давление, пандемия, карантин, Уфа; air pollution, air quality, air temperature, atmospheric pressure, pandemic, insolation period, Ufa.

Введение

Загрязнение атмосферного воздуха является одним из самых опасных факторов воздействия на окружающую среду [1]. Поэтому охрана атмосферного воздуха относится к числу приоритетных направлений в области геоэкологии и метеорологии [2, 3]. Для реализации мероприятий по охране атмосферного воздуха необходимо знать закономерности процессов аккумуляции и рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере [4–7]. Существенное влияние на эти процессы оказывают метеорологические

условия [8–13]. Атмосфера Земли — динамичная среда, в которой происходят постоянные изменения метеорологических параметров: приземной температуры воздуха, температуры воздуха на разных высотах, атмосферного давления, направления и скорости ветра на разных высотах и др. [14, 15]. Изменения метеорологических параметров приводят к необходимости учета взаимосвязи загрязнения атмосферного воздуха с метеорологическими условиями [16–18].

Согласно [19] к загрязняющим веществам относятся смеси веществ, рассеянных в атмосфере в виде аэрозолей и не входящих в ее постоянный состав. Аэрозоли в основном представляют собой мелкие частицы (диаметром от 10^{-7} до 10^{-5} мм), способные относительно длительное время (от нескольких суток до нескольких лет) удерживаться в атмосфере [1, 2, 19]. Такие примеси активно вступают в химические реакции с молекулярным кислородом O_2 ,

*Денис Юрьевич Васильев (vasilev.dyu@ugatu.su), Павел Владимирович Вельмовский (velmovskiy@gmail.com); Владимир Анатольевич Семенов (vasemenov@ifaran.ru); Гузель Нургалеевна Семенова (guzelsemenova@mail.ru); Александр Александрович Чибилев (orensteppe@mail.ru).

малыми газовыми составляющими (O_3 , CO_2 , CO , N_2O) и свободными радикалами (OH , HO_2 , N) [19]. В зависимости от источников образования примеси подразделяются на природные и антропогенные [1, 2, 19]. По данным ряда исследований [14, 15, 16–22], содержание в атмосфере природных аэрозолей больше, чем антропогенных. Однако в крупных промышленных областях и над урбанизированными территориями содержание антропогенных аэрозолей превышает содержание природных [15, 23]. Загрязнение атмосферы, обусловленное антропогенным воздействием, в основном представлено сернистым газом (SO_2), оксидом углерода (CO), диоксидом углерода (CO_2), окислами азота (NO_x), сероводородом (H_2S), различными углеводородами и аммиаком (NH_3) [15, 23]. По результатам мониторинга и анализа качества воздуха за последние десятилетия [15, 24–31] на территории России выделяются несколько районов с высоким уровнем загрязнения атмосферы: Прибайкалье и Забайкалье, юг Сибири, Средний и Южный Урал, Московская, Тульская обл. Город Уфа является одним из крупных промышленных центров Южного Урала с высоким уровнем загрязнения атмосферы [15, 32].

Цель данной работы — оценить влияние метеорологических условий на уровень загрязнения атмосферного воздуха в г. Уфе.

Территория, данные и методы исследования

Согласно официальным данным Федеральной службы государственной статистики (<https://rosstat.gov.ru>) на 1.01.2020 г. численность населения Уфы составляла 1 140 273 чел., площадь 715,14 км². Город находится в пределах Прибельской равнины, в 100 км к западу от хребтов Урала. Основная его часть расположена в междуречье р. Белой и Уфы, с трех сторон город опоясывает речное кольцо длиной 80 км. Климат города континентальный, основные сведения о метеорологических характеристиках приведены в табл. 1.

Таблица 1

Средние многолетние значения (нормы) метеорологических характеристик г. Уфы с 2017 по 2020 г.

Метеорологическая характеристика	Значение
Осадки, количество дней	207
Повторяемость приземных инверсий температуры, %	37
Повторяемость застоев воздуха, %	22
Повторяемость ветров со скоростью 0–1 м/с, % (независимо от температурных инверсий)	27
Повторяемость ветров со скоростью 0–1 м/с, % (без приземных температурных инверсий)	9
Повторяемость приподнятых инверсий температуры, %	52
Повторяемость туманов, %	0,5

Базой для анализа послужили ежедневные данные инструментальных наблюдений с 2017 по 2020 г. на девяти расположенных в Уфе стационарных

станциях, принадлежащих Башкирскому управлению по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета (<https://www.meteorf.gov.ru>) (рис. 1).

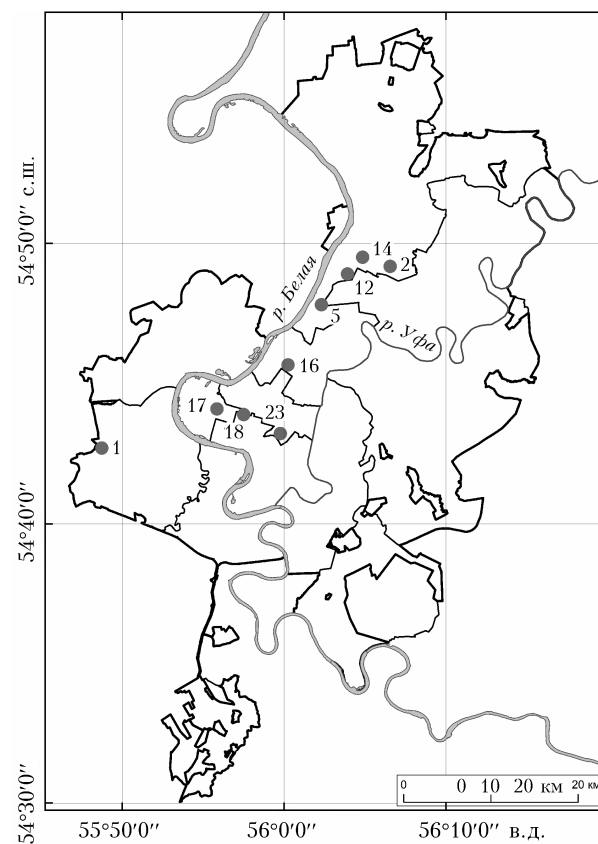


Рис. 1. Карта г. Уфы с выделенными административными округами; серыми точками показаны девять стационарных станций наблюдения за состоянием окружающей среды

Наблюдательная сеть работает в соответствии с руководящим документом 52.04.186-89 [33], а станции условно подразделяются на «городские фоновые», расположенные в жилых районах Уфы (станции 1, 12, 16 и 17), «промышленные», находящиеся вблизи предприятий (станции 14, 18), и «придорожные» — вблизи автомагистралей, в районах с интенсивным движением транспорта (станции 2, 5 и 23). Отметим, что станция 1 расположена на территории метеостанции «Уфа». Первоначально государственная наблюдательная сеть включала 23 станции, но за последние десятилетия количество станций сократилось до девяти. Именно поэтому инвентаризационные номера станций не имеют строгой последовательности. Регулярные наблюдения с целью получения информации о разовых концентрациях загрязняющих веществ на этих станциях проводятся по неполной программе ежедневно в 07:00, 13:00 и 19:00 по местному декретному времени [33].

В результате взаимного наложения и перемешивания выбросов многих источников формируется общегородское загрязнение воздуха. В связи с этим большие концентрации вредных веществ могут отмечаться вне зоны прямого действия источников их

выбросов в атмосферу. Уровень загрязнения воздуха под влиянием метеорологических условий может одновременно изменяться на всей территории города и характеризоваться обобщенным (интегральным) показателем, который вычисляется по данным инструментальных наблюдений [33]. В метеорологической и геоэкологической практике таким интегральным показателем является параметр P [34], который рассчитывается по формуле

$$P = \frac{m}{n}, \quad (1)$$

где n — общее количество измерений концентрации примесей в городе в течение одного дня на всех стационарных постах; m — количество измерений в тот же день, в которых концентрации примесей превышают среднее значение более чем в 1,5 раза. Таким образом, P представляет собой отношение количества существенно превышенных концентраций (относительно среднего значения) к общему числу измерений в течение дня. В геоэкологической и метеорологической практике [24] P ранжируют по следующим уровням: относительно высокий ($> 0,35$), повышенный ($0,21 \leq P \leq 0,35$) и пониженный ($\leq 0,20$).

Для определения тенденций в изменении уровня загрязнения атмосферы отдельными примесями использовалась формула [33]:

$$T_q = \frac{q_{\text{ср}2020} - q_{\text{ср}2017}}{q_{\text{ср}2017}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $q_{\text{ср}2017}$ и $q_{\text{ср}2020}$ — средние годовые значения концентрации примеси за 2017 и 2020 гг.

Для выявления периодичности в колебаниях параметра P в данной работе был использован метод вейвлет-анализа [35], а для оценки влияния метеорологических условий на уровень загрязнения атмосферного воздуха проведен кросс-вейвлет-анализ с данными инструментальных наблюдений на метеорологических станциях [36]. Подробно эти методы описаны в работах [37, 38].

Результаты

Средние суточные значения основных метеорологических параметров вместе с результатами вычислений P в отдельные годы представлены на рис. 2–5.

Определяющими факторами качества атмосферного воздуха городских территорий являются расположение и интенсивность источников выбросов и физико-географические особенности самого города. В Уфе имеется более 60 стационарных источников загрязнения, большинство из которых, однако, производят незначительные выбросы. Главные источники загрязнения атмосферы расположены в северной части города, что создает крайне неблагоприятные условия для сохранения оптимального состояния атмосферы в промышленной зоне. Орографические особенности Уфы (вытянутое с северо-

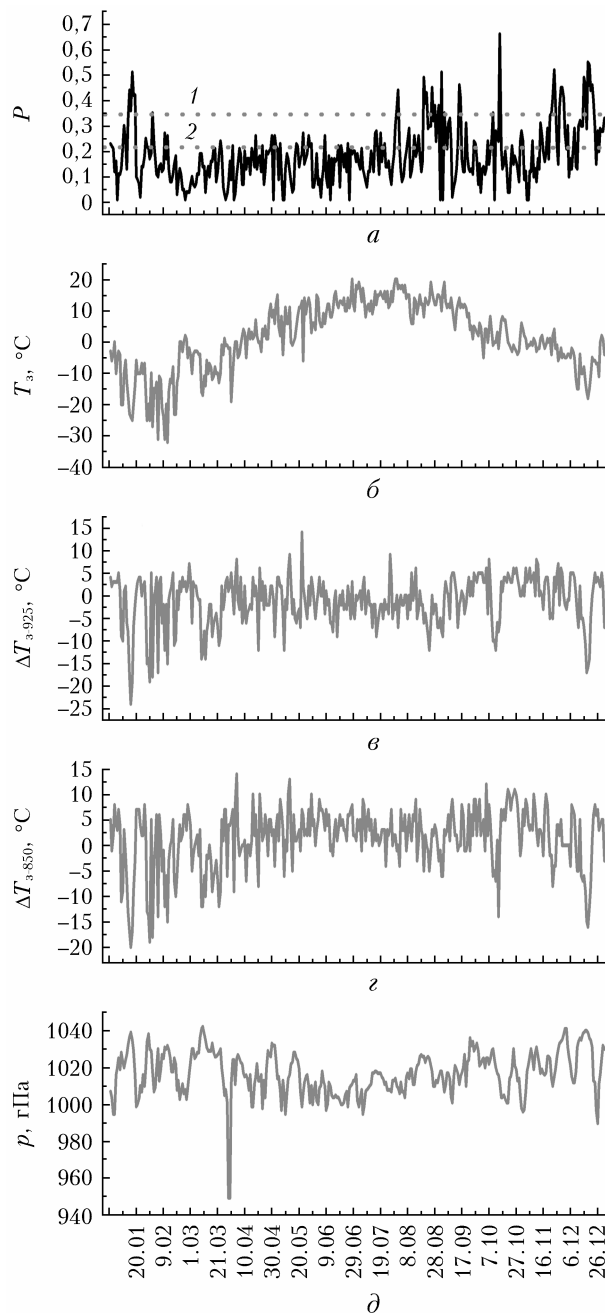


Рис. 2. Внутригодовой ход параметра P и основных метеорологических характеристик: T_z — приземная температура воздуха (б); ΔT_{z-925} , ΔT_{z-850} — разности между температурой воздуха в слоях до 925 гПа и до 850 гПа и приземным значением (в, г); p — атмосферное давление (д) в Уфе в 2017 г. Серым пунктиром указаны повышенный (1) и относительно высокий (2) уровни загрязнения атмосферы

востока на юго-запад Уфимское плато, на котором расположена основная часть города, и речные долины с близкой к меридиальной ориентацией) в сочетании с метеорологическими условиями способствуют формированию концентрических ореолов загрязнения, что также было отмечено в работе [39]. Преобладают в основном южные и юго-восточные ветра (рис. 6), что благоприятно сказывается

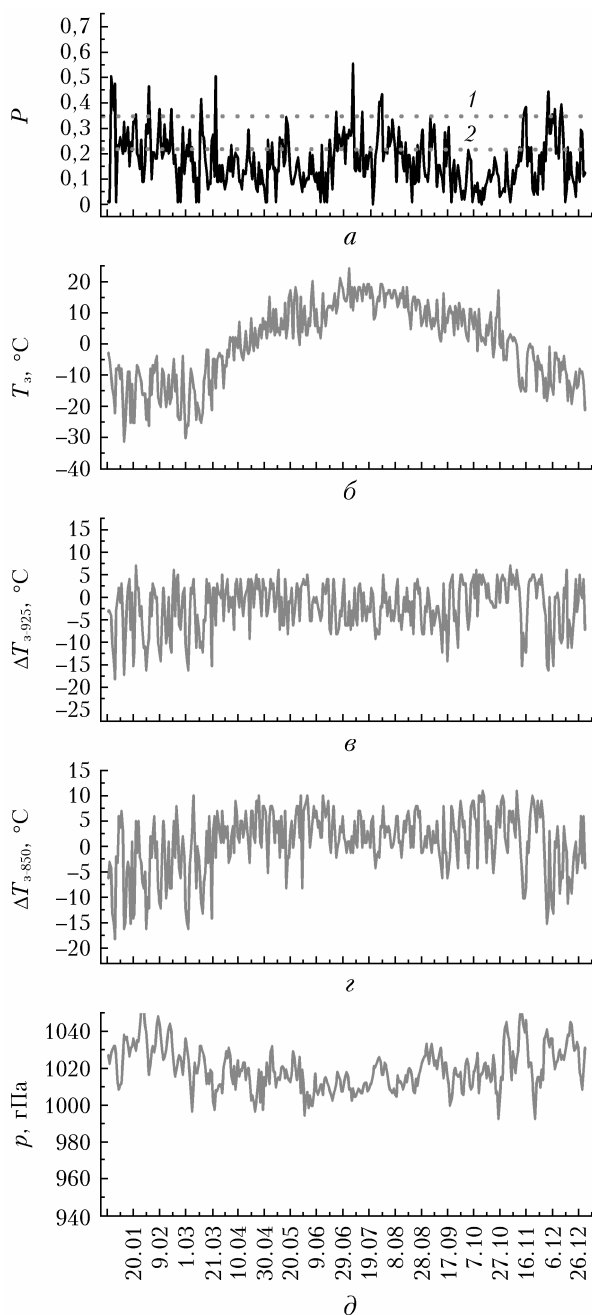


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, в 2018 г.

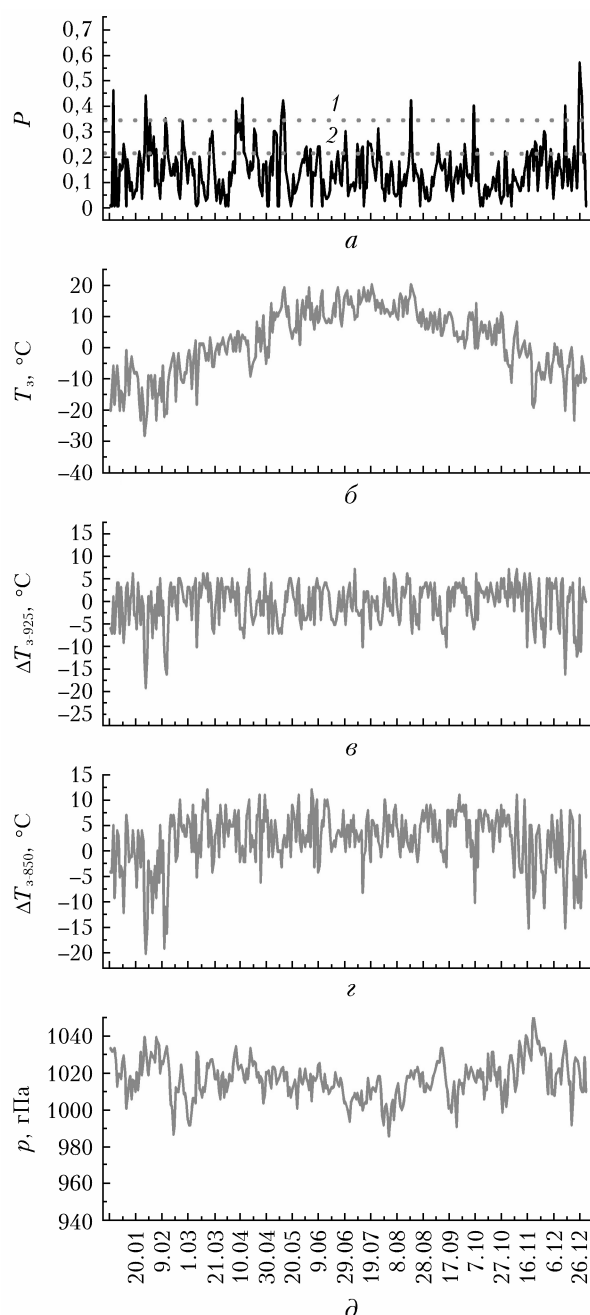


Рис. 4. То же, что и на рис. 2, в 2019 г.

на качестве атмосферного воздуха на большей территории города, поскольку загрязняющие атмосферные вещества переносятся на север или северо-запад.

Отметим, что в Уфе основной вклад в суммарные выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников вносят предприятия нефтеперерабатывающей промышленности (73,1%) и электроэнергетики (7,5%), а также автомобильный транспорт (19,4%). Объем валовых выбросов за 2017–2020 гг. составил $128,5 \cdot 10^3$ т, увеличение выбросов по сравнению с предыдущими пятью годами составило $31,3 \cdot 10^3$ т (24,4%). Однако уровень загрязнения в Уфе за период 2017–2020 гг. низкий и опре-

деляется в основном содержанием в атмосфере города диоксида серы, ксилолов и толуола (табл. 2).

К настоящему времени не произошло значительного улучшения качества атмосферного воздуха, что связано с введением новых предельно допустимых концентраций (ПДК). Анализ многолетних данных уровня загрязнения атмосферного воздуха Уфы позволил установить тенденцию к его снижению, что подтверждается оценкой внутригодового распределения загрязняющих атмосферу веществ.

Действительно, из табл. 2 видно, что за 2017–2020 гг. средняя годовая концентрации взвешенных

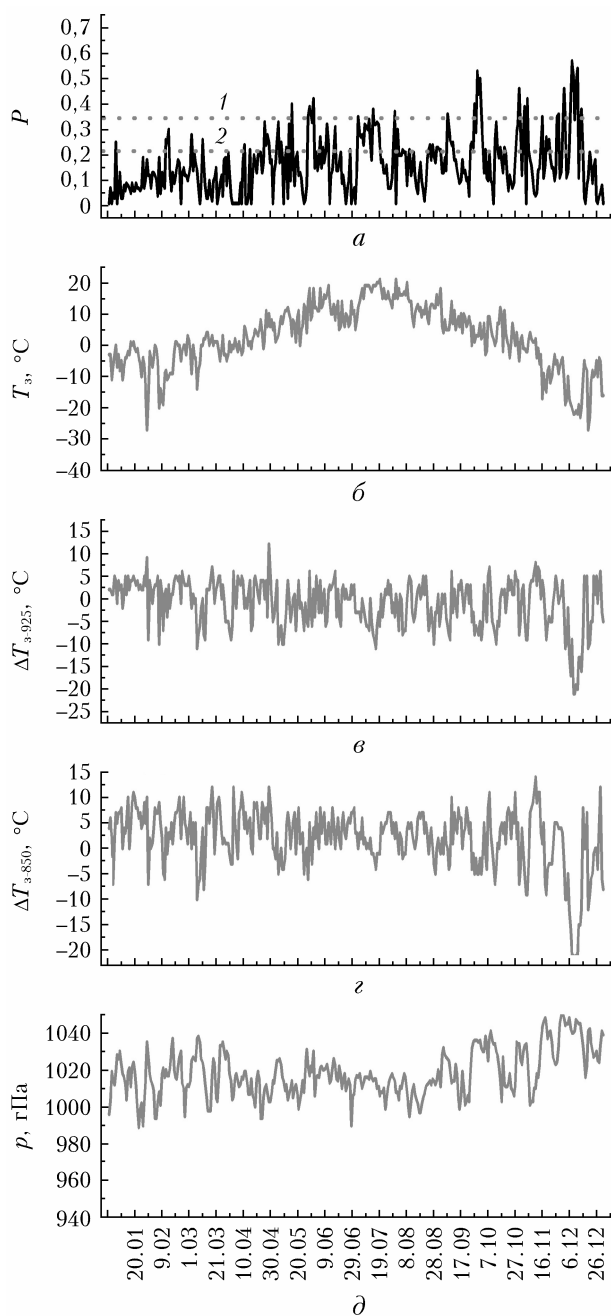


Рис. 5. То же, что и на рис. 2, в 2020 г.

веществ составила 0,6ПДК_{ср}, максимальная разовая концентрация в среднем составила 4,6ПДК_м. Средняя годовая концентрация диоксида серы (SO₂) за аналогичный период была в среднем 0,1ПДК_{ср} и 1,3ПДК_м. Средняя годовая концентрация диоксида азота (NO₂) составила 0,8ПДК_{ср}, максимальная разовая в среднем составила 1,6ПДК_м. Средняя годовая концентрация оксида азота (NO) — 0,1ПДК_{ср}, а максимальная разовая — 0,9ПДК_м. Средняя годовая концентрация оксида углерода (CO) была ниже 1ПДК_{ср} и составила 0,2ПДК_{ср}, а максимальная разовая концентрация — 2,5ПДК_м. Средняя годовая концентрация фенола — 0,2ПДК, максимальная разовая концентрация в среднем 1,5ПДК_м. Средняя

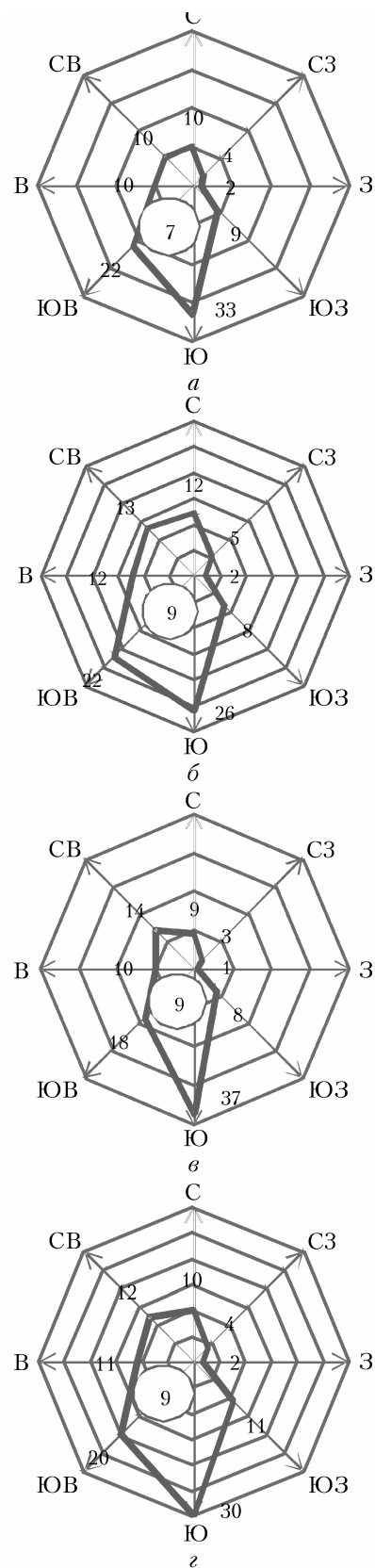


Рис. 6. Векторная диаграмма годового режима ветра в Уфе (роза ветров): а — 2017 г.; б — 2018 г.; в — 2019 г.; г — 2020 г.; цифрами обозначена частота (повторяемость) ветров различного направления, %; число в центре круга — частота появления штиля

Таблица 1

Разовые максимальные, средние годовые значения ПДК загрязняющих веществ в соответствии с нормативами ГГО им. А.М. Воейкова [33], превышения ПДК и тенденции в изменении уровня загрязнения атмосферы (T) различными примесями в г. Уфе за 2017–2020 гг.

Наименование примеси	ПДК _м , мг/м ³	ПДК _{ср} , мг/м ³	Превышение ПДК _{ср}				Превышение ПДК _м				T , %
			2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020	
Взвешенные вещества	0,5	0,075	0,6	0,6	0,6	0,4	4,6	4,6	4,6	3,2	-41,9
Диоксид серы	0,5	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	1,5	1,5	1,5	+33,3
Оксид углерода	5,0	3,0	0,2	0,2	0,2	0,2	3,4	2,4	2,5	1,6	-16,7
Диоксид азота	0,2	0,04	0,8	0,8	0,8	0,8	1,5	1,6	1,6	1,7	-3,1
Оксид азота	0,4	0,06	0,2	0,1	0,1	0,1	0,8	1,0	1,0	0,9	-27,3
Сероводород	0,008	0,002	—	—	—	—	9,5	9,1	9,1	8,1	0,0
Фенол	0,01	0,03	0,2	0,2	0,2	0,2	2,6	1,0	1,0	1,4	0,0
Хлорид водорода	0,2	0,02	0,3	0,3	0,3	0,2	2,4	2,9	2,9	1,6	0,0
Аммиак	0,2	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,5	0,5	1,8	0,0
Формальдегид	0,01	0,003	0,5	0,5	0,5	0,3	1,0	0,6	0,7	1,4	-40,0
Бензол	0,3	0,005	0,1	0,1	0,1	0,1	1,6	1,3	1,2	1,4	0,0
Ксилолы	0,2	0,1	—	—	—	—	4,0	0,5	0,5	2,5	+400,0
Толуол	0,6	0,4	—	—	—	—	3,5	0,8	0,7	0,5	+100,0
Этилбензол	0,02	0,004	—	—	—	—	9,5	6,5	6,8	9,0	0,0

Примечание. Символом «—» обозначен уровень загрязнения по отдельным примесям в несколько раз ниже ПДК_{ср}.

годовая концентрация хлорид водорода (HCl), аммиака и формальдегида оказалась ниже 1ПДК_{ср}, максимальная разовая концентрация хлорид водорода — 2,5ПДК_м, аммиака — 0,9ПДК_м, формальдегида — 0,9ПДК_м. Средние годовые концентрации сероводорода, ксилолов, толуола, этилбензола оказались в несколько раз ниже уставленных норм ПДК_{ср}, максимальные разовые концентрации сероводорода — 9,0ПДК_м, ксилола — 1,9ПДК_м, толуола — 1,3ПДК_м, этилбензола — 8,0ПДК_м.

Необходимо отметить, что введение в 2020 г. карантина в связи с пандемией практически не изменило уровень загрязнения воздуха. Это объясняется тем, что большинство предприятий, являющихся основными источниками загрязнения атмосферы в Уфе, относятся к стратегическим и поэтому не приостанавливали свою работу [40].

Анализ годового хода метеорологических величин и параметра P позволяет оценить влияние погодных условий на режим загрязнения воздуха. Из графиков внутригодового хода метеовеличин (рис. 2–5) видно, что в дни, когда наблюдалась инверсия температуры, значение P было повышенным или относительно высоким. Инверсия температуры происходит при неблагоприятных метеорологических условиях и отражает формирование устойчивой стратификации в тропосфере, что приводит к задерживанию распространения примесей в атмосфере. Практически ежедневно в ночное время в Уфе наблюдаются приземные и приподнятые инверсии, которые с восходом солнца, как правило, разрушаются. Из-за ослабления вертикального обмена воздушных масс при инверсиях наблюдаются опасные скопления примесей в атмосфере, источниками которых являются автотранспорт и большое количество промышленных предприятий. Высокий уровень загрязнения приземного слоя воздуха был

также установлен при слабых ветрах и штилях. По данным фактических наблюдений (см. рис. 6) в годовом ходе повторяемости скорости ветра 0–1 м/с (см. табл. 1) отмечаются слабый максимум летом и минимум зимой. В течение года на Уфимском плато преобладают южные и юго-восточные ветра, именно по этой причине крупные предприятия нефтеперерабатывающей промышленности размещены в северной и северо-восточной частях города. Очевидно, что увеличение скорости ветра способствует уменьшению концентрации вредных веществ в атмосфере. Действительно, низкие значения P совпадают с холодными периодами в Уфе, когда повторяемость ветров со скоростью более 1 м/с наибольшая. Значения P при наличии и отсутствии ветра приведено в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость P от скорости ветра v при наличии и отсутствии приземной инверсии в Уфе в 2017–2020 гг.

Наличие		Отсутствие	
P	v , м/с	P	v , м/с
0,30	0	0,20	0
0,35	1	0,11	1
0,24	2	0,09	2
0,09	3	0,19	3
0,05	4	0,22	4
0,01	5	0,13	5

По аналогии с [41] в данной работе был проведен вейвлет-анализ преобразования массива ежедневных значений P за 2017–2020 гг., результаты которого показаны на рис. 7. Выявленные с помощью вейвлет-разложения составляющие в колебаниях значений P можно условно разделить на три группы: первая группа — это высокочастотные из-

менения с периодами 5 и 30 сут, вторая — среднечастотные, с периодами 90 и 180 сут, третья — низкочастотные, с периодами 245 и 356 сут. На рис. 7, *а* показана временная локализация выявленных периодов с указанием статистической значимости (с 90%-й доверительной вероятностью) в виде «конуса влияния». Рис. 7, *б* демонстрирует периодограмму выявленных частот мощность каждой из составляющих анализируемого сигнала.

Следующим шагом был кросс-вейвлет-анализ для установления тесноты связи и согласованности/когерентности колебаний параметра P с метеорологическими величинами (атмосферное давление, приземная температура воздуха, разность между температурой воздуха в слоях до 925 и до 850 гПа и приземной температурой). Результаты кросс-корреляции параметра P с метеорологическими величинами показаны на рис. 8.

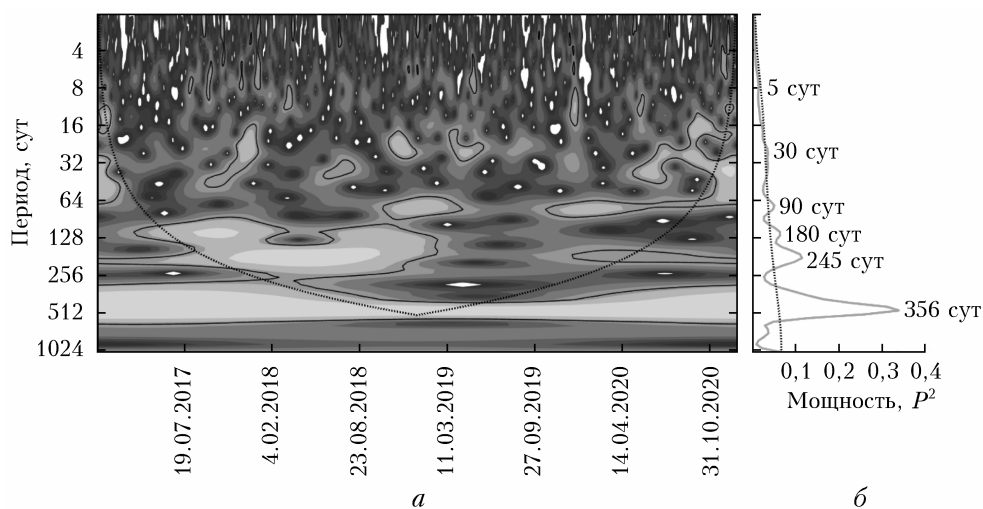


Рис. 7. Вейвлет-анализ спектра параметра P : *а* — локальный; *б* — глобальный

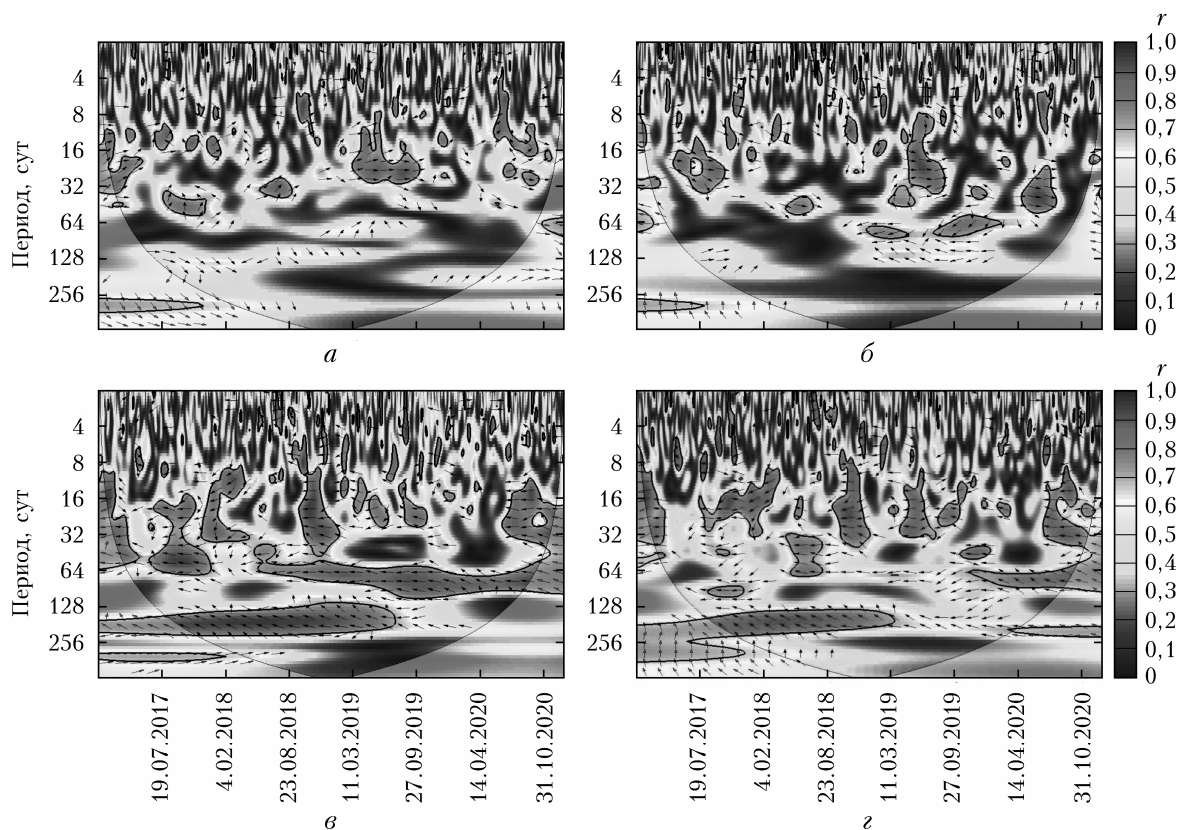


Рис. 8. Кросс-вейвлет-анализ колебаний параметра P , атмосферного давления (*а*), приземной температуры воздуха (*б*), разности температуры в слоях до 925 (*в*) и до 850 гПа (*г*) и приземной температуры

Направление стрелок на рис. 8 указывает характер выявленных колебаний: вправо — синфазно, влево — противофазно, вниз и вверх — опережение или запаздывание (на $\pi/2$) колебаний P по сравнению с колебаниями метеовеличин. С целью установления количественной меры тесноты связи в разных временных масштабах были вычислены корреляционные отношения для колебаний исследуемых параметров. Кросс-вейвлет-анализ колебаний параметра P с атмосферным давлением и приземной температурой воздуха (рис. 8, *а* и *б*) установил синфазный характер анализируемых колебаний в высокочастотной области (периоды 5–30 сут). Результаты анализа установления когерентности в колебаниях рядов P с разностью температур воздуха в слоях до 925 и 850 гПа с приземной температурой показали статистически значимую связь в средне- и низкочастотной областях спектров. Установлено, что для статистически значимых периодов характер связи был преимущественно противофазным с коэффициентом корреляции r от 0,75 до 0,99.

Заключение

Наиболее высокий уровень загрязнения воздуха в Уфе зафиксирован в промышленной зоне города. Основные источники загрязнения — предприятия нефтеперерабатывающей промышленности, вклад которых составил более чем 2/3 от всех выбросов в атмосферу города. В летний сезон с ростом температуры увеличивается концентрация практически всех примесей в атмосфере. Выявлено, что увеличение концентрации загрязняющих веществ наблюдается при ветрах со стороны промышленных предприятий, а также при штиле. Для оценки степени загрязнения воздуха г. Уфы вычислены значения параметра загрязнения атмосферы P . С помощью вейвлет-преобразования проведен анализ рядов данных P . В результате анализа установлены нескольких характерных циклов изменчивости P , различных по продолжительности и частоте. Выявленные высокочастотные колебания, по всей видимости, связаны с продолжительностью рабочей недели и развитием естественного синоптического периода. Среднечастотные и низкочастотные колебания обусловлены сменой климатических сезонов (атмосферной циркуляции) и вращением Земли вокруг Солнца. Для связи выявленных колебаний параметра P с метеовеличинами был проведен кросс-вейвлет-анализ, который показал большую степень связи P с разностью температур воздуха в слоях до 925 и 850 гПа по сравнению с приземной температурой воздуха и атмосферным давлением. Для более качественного мониторинга уровня загрязнения атмосферного воздуха в Уфе необходимо увеличить число государственных станций наблюдательной сети Росгидромета.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю признательность начальнику Башкирского УГМС

(Росгидромет) В.З. Гороховской и старшему научному сотруднику Гидрометцентра (Росгидромет) И.Н. Кузнецовой за ценные замечания и полезные советы, высказанные в ходе подготовки статьи.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания «Проблемы степного природопользования в условиях современных вызовов: оптимизация взаимодействия природных и социально-экономических систем» (№ АААА-А21-121011190016-1), при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2020-776).

Список литературы

1. Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 184 с.
2. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В. Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 224 с.
3. Binita K.C., Shepherd J.M., King A.W., Gaither C.J. Multi-hazard climate risk protections for the United States // Nat. Hazards. 2021. V. 105. P. 1963–1976. DOI: 10.1007/s11069-020-04385-y.
4. Guo J., Wu X., Guo Y., Tang Y., Dzandu M.D. Spatiotemporal impact of major events on air quality based on spatial differences-in-differences model: Big data analysis from China // Nat. Hazards. 2021. V. 107. P. 2583–2604. DOI: 10.1007/s11069-021-04517-y.
5. Hombari F.J., Pazhoh F. Synoptic analysis of the most durable pollution and clean waves during 2009–2019 in Tehran City (capital of Iran) // Nat. Hazards. 2022. V. 110. P. 1247–1272. DOI: 10.1007/s11069-021-04990-5.
6. Sicard P., Agathokleouz E., De Marco A., Paoletti E., Catayud V. Urban population exposure to air pollution in Europe over the last decades // Environ. Sci. Europe. 2021. V. 33, N 28. P. 1–12. DOI: 10.1186/s12302-020-00450-2.
7. Shafie S.H.M., Mahmud M., Mohamad S., Rameh N.L.F., Abdullah R., Mohamed A.F. Influence of urban air pollution on the population in Klang Valley, Malaysia: A spatial approach // Ecol. Process. 2022. V. 11, N 3. P. 1–16. DOI: 10.1186/s13717-021-00342-0.
8. Белан Б.Д., Савкин Д.Е. Роль влажности воздуха в изменении приземной концентрации озона // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 5. С. 395–398; Belan B.D., Savkin D.E. The role of air humidity in variations in near-surface ozone concentration // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 5. P. 586–589.
9. Васильев Д.Ю., Водотьянов В.В., Семенов В.А., Чибилев А.А. Оценка тенденций изменения засушливости для территории Южного Урала в период 1960–2019 гг. с использованием различных методов // Докл. РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 494, № 1. С. 91–96.
10. Васильев Д.Ю., Кучеров С.Е., Семенов В.А., Чибилев А.А. Оценка метеорологических факторов пожарной опасности на территории Южного Урала // География и природные ресурсы. 2022. Т. 43, № 2. С. 61–168.
11. Васильев Д.Ю., Лукманов Р.Л., Феропонтов Ю.И., Чувывров А.Н. Цикличность гидрометеорологических характеристик на примере Башкирии // Докл. АН. 2012. Т. 447, № 3. С. 331–334.

12. Васильев Д.Ю., Павлейчик В.М., Семенов В.А., Сивохин Ж.Т., Чибилев А.А. Многолетний режим температуры воздуха и атмосферных осадков на территории Южного Урала // Докл. РАН. 2018. Т. 478, № 5. С. 588–592.
13. Васильев Д.Ю., Ферапонтов Ю.И. Тренды в колебаниях приземной температуры воздуха на примере Башкирии // Изв. РАН. Сер. геогр. 2015. № 1. С. 77–86.
14. Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Беликов И.Б., Скороход А.И., Шумский Р.А. Изменчивость газовых примесей в приземном слое атмосферы Москвы // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2007. Т. 43, № 2. С. 246–259.
15. Клюев Н.Н. Качество атмосферного воздуха российских городов в 1991–2016 гг. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 1. С. 14–23.
16. Копров Б.М., Копров В.М. О корреляциях между полями температуры, малых газовых примесей и ветра в приземном слое атмосферы // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2020. Т. 56, № 5. С. 540–546.
17. Локощенко М.А., Богданович А.Ю., Еланский Н.Ф., Лезина Е.А. Температурные инверсии в Москве и их влияние на состав приземного воздуха // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2021. Т. 57, № 6. С. 641–650.
18. Локощенко М.А., Еланский Н.Ф., Малишова В.П., Трифанова А.В. Динамика приземного содержания двуокиси серы в Москве // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 5. С. 441–449.
19. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. М.: Мир, 1987. 280 с.
20. Алексеева М.Н., Рапута В.Ф., Ярославцева Т.В., Яценко И.Г. Оценка атмосферного загрязнения при сжигании попутного газа по данным дистанционных наблюдений теплового излучения // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 11. С. 915–919; Alekseeva M.N., Raputa V.F., Yaroslavtseva T.V., Yashchenko I.G. Estimation of air pollution due to gas flaring from remote observations of flare thermal radiation // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 3. P. 289–294.
21. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. О природе мезомасштабных вариаций концентрации приземных атмосферных примесей // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 425–429.
22. Чубарова Н.Е., Незваль Е.И., Беликов И.Б., Горбаренко Е.В., Еремина И.Д., Жданова Е.Ю., Корнева И.А., Константинов П.И., Локощенко М.А., Скороход А.И., Шиловцева О.А. Климатические и экологические характеристики московского мегаполиса за 60 лет по данным Метеорологической обсерватории МГУ // Метеорол. и гидрол. 2014. № 9. С. 49–64.
23. Гинзбург А.С., Семенов В.А., Семутникова Е.Г., Алезина М.А., Захарова П.В., Лезина Е.А. Влияние ограничений, обусловленных COVID-19, на качество воздуха в Москве // Докл. РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 495, № 1. С. 74–79.
24. Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Фофанов А.В., Sasakawa M., Machida T. Влияние атмосферного блокирования в Западной Сибири на изменение концентрации метана и углекислого газа в зимний период // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 3. С. 221–227.
25. Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н. Многолетняя изменчивость концентрации озона и аэрозоля в приземном слое атмосферы и прогноз ее изменения на основании предсказанного в 24-м цикле уровня солнечной активности // Солнечно-земная физика. 2012. Вып. 21. С. 46–50.
26. Панченко М.В., Польшкин В.В., Польшкин Вас.В., Козлов В.С., Яушева Е.П., Шмаргунов В.П. Распределение по размерам «сухой основы» частиц в приземном слое атмосферы пригородного района г. Томска в рамках эмпирической классификации типов «аэрозольной погоды» // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 7. С. 539–547; Panchenko M.V., Pol'kin V.V., Pol'kin Vas.V., Kozlov V.S., Yausheva E.P., Shmargunov V.P. Size distribution of dry matter of particles in the surface atmospheric layer in the suburban region of Tomsk within the empirical classification of aerosol weather types // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 6. P. 655–662.
27. Панченко М.В., Терпугова С.А., Докукина Т.А., Польшкин В.В., Яушева Е.П. Многолетняя изменчивость конденсационной активности аэрозоля в г. Томске // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 4. С. 314–318; Panchenko M.V., Terpigova S.A., Dokukina T.A., Pol'kin V.V., Yausheva E.P. Multiyear variations in aerosol condensation activity in Tomsk // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 4. P. 251–255.
28. Кузнецова И.Н. Влияние метеорологических условий на загрязнение воздуха города Москвы в летних эпизодах 2010 г. // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2012. Т. 48, № 5. С. 566–577.
29. Ситнов С.А., Адикс Т.Г. Недельная изменчивость приземных концентраций СО в Москве // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2014. Т. 50, № 2. С. 185–196.
30. Кабанов Д.М., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Корниенко Г.И., Нагуслаев С.А., Павлов А.Н., Панченко М.В., Пестунов Д.А., Сакерин С.М., Шмирко К.А. О результатах двухточечных измерений аэрозольной оптической толщи атмосферы в нескольких регионах России // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 11. С. 960–971.
31. Локощенко М.А., Еланский Н.Ф., Трифанова А.В., Беликов И.Б., Скороход А.И. О предельных уровнях загрязнения воздуха в Москве // Вестн. МГУ. Сер. 5. Геогр. 2016. № 4. С. 29–39.
32. Korunov A.O., Khalikov I.S., Surnin V.A. Seasonal variation and spatial distribution of the content of benzo(a)pyrene in the atmospheric air in the Russian Federation // Rus. J. General Chem. 2020. V. 90, N 13. P. 2670–2680.
33. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. М.: Госкомгидромет СССР, 1991. 683 с.
34. Сонькин Л.Р. Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 223 с.
35. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145–1170.
36. Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // Nonlinear Process. Geophys. 2004. V. 11. P. 561–566.
37. Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // Bull. Am. Meteor. Soc. 1998. V. 79. P. 61–78.
38. Maraun D., Kurths J. Cross wavelet analysis: Significance testing and pitfalls // Nonlinear Process. Geophys. 2004. V. 11. P. 505–514.
39. Васильев Д.Ю., Вельмовский П.В., Семенова Г.Н., Чибилев А.А. Остров тепла в пограничном слое атмосферы и концентрация загрязняющих веществ над

- городом Уфа в 2021 г. // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507, № 2. С. 356–362.
40. Постановление правительства РФ от 10 мая 2020 г. № 651 «О мерах поддержки системообразующих организаций».
41. Бородулин А.И., Сафатов А.С., Хуторова О.Г., Белан Б.Д., Панченко М.В. О периодической структуре полей концентрации биоаэрозолей в тропосфере юга Западной Сибири // Докл. АН. 2004. Т. 398, № 6. С. 800–802.

D.Yu. Vasil'ev, P.V. Velmovsky, V.A. Semenov, G.N. Semenova, A.A. Chibilev. The influence of meteorological conditions on the level of atmospheric air pollution in Ufa.

The results of the analysis of changes in the quality of atmospheric air in the city of Ufa from 2017 to 2020 are presented. The influence of meteorological factors on the level of pollution in the city of Ufa is considered. The basis for the analysis are instrumental measurements at nine Roshydromet stations. The daily values of the atmospheric pollution parameter are calculated. Trends in the level of atmospheric pollution by various impurities are determined. Using the method of wavelet transformation, the characteristic periods in the variations in the level of pollution are ascertained. Using the cross-wavelet analysis, links between air pollution and dangerous meteorological parameters are revealed. It is found that the average concentrations of sulfur dioxide, xylenes, and toluene increased in 2017–2020; high level of atmospheric pollution is observed in the calm weather, light winds, and temperature inversions. The observed changes in urban air pollution provide unique grounds for experimental assessment of the impact of various anthropogenic factors on the qualitative composition of atmospheric air.