

Оценка роли метеорологических условий в формировании аэротехногенного загрязнения городской среды

Л. М. Акимов , Е. Л. Акимов

Воронежский государственный университет, Российская Федерация
(394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1)

Аннотация: Целью статьи явилось установление связей между различными параметрами атмосферной турбулентности, описывающими вертикальное перемешивание воздуха, и концентрациями загрязняющих веществ.

Материалы и методы исследования основываются на анализе данных стационарных постов наблюдения о концентрации загрязняющих веществ, а также данных температурно-ветрового зондирования атмосферы Воронежа. Произведены вычисления индексов устойчивости атмосферы, установлены их критериальные значения устойчивости атмосферы. Для определения тесноты связей между параметрами устойчивости атмосферы и поллютантами использовался корреляционный анализ.

Результатами исследования явилось установление пространственных и временных закономерностей распространения поллютантов, а также выявление зависимости их концентрации от устойчивости атмосферы. Наибольшая загрязненность воздуха наблюдается на левом берегу Воронежского водохранилища, особенно летом, с плотным автомобильным потоком и развитой промышленностью. Вероятность превышения ПДК м.р. в летнее время у пыли составило 47,0%, у диоксида азота 83,4%. Летом также наблюдается увеличение вероятности превышения концентраций ПДК м.р. у формальдегида (СН₂О) до 54,9%. Зимой превышения ПДК м.р. формальдегида не наблюдается, что свидетельствует о зависимости концентрации СН₂О от температуры и указывает на годовой ход.

Выводы. Доказана целесообразность использования индексов устойчивости атмосферы для прогноза концентрации загрязняющих веществ. Корреляционная связь между концентрациями загрязняющих веществ и индексами устойчивости атмосферы летом достигает заметного уровня ($r = 0,45 - 0,55$), а для пыли и формальдегида с индексом САРЕ она высокая и достигает значений 0,79 и 0,80, соответственно.

Ключевые слова: индексы устойчивости, стабильность атмосферы, турбулентность, концентрация, загрязняющие вещества, вероятность, корреляция.

Источник финансирования: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-17-00172, <https://rscf.ru/project/20-17-00172/>

Для цитирования: Акимов Л. М., Акимов Е. Л. Оценка роли метеорологических условий в формировании аэротехногенного загрязнения городской среды // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2023, № 3, с. 68-78. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/3/68-78>

ВВЕДЕНИЕ

На долю антропогенного загрязнения атмосферного воздуха приходится основная часть вредных выбросов, которые являются более опасными, чем загрязнения природного происхождения. От состояния окружающей среды на 20-30% зависит состояние здоровья населения, особенно у

пожилых людей с хроническими болезнями сердца и легких [7].

Безуглая Э. Ю. [5] отмечает, что «загрязнение атмосферного воздуха антропогенными примесями, поступающими от промышленных предприятий, топливно-энергетических объектов, аграрного комплекса, транспорта достигло уровня, угро-

жающего сохранению экологического равновесия природной среды». Поэтому изучение законов распространения примесей в атмосфере и связанного с ним техногенного загрязнения атмосферы приобретает все более актуальное значение.

Теоретические основы проблемы загрязнения атмосферного воздуха антропогенными примесями и их влияния на экосистемы окружающей среды изложены в трудах К.С. Буштуевой [7], Э.Ю. Безуглой [4, 5], М.Е. Берлянда [6], Ю.А. Израэля [9], А.А. Исаева [10], I. Turiel [19], R. Wilson [20] и др.

Следует отметить большое количество региональных исследований, посвященных роли загрязнения атмосферы в формировании общественного здоровья. К наиболее значимым исследованиям, посвященным изучению данной тематики в Воронеже, можно отнести публикации М.И. Чубирко [14], Н.П. Мамчика, О.В. Клепикова с соавт. [12], Л.Н. Костылевой [11], Л.М. Акимова [1-3], С.А. Куролапа с соавт. [8], А.В. Назаренко [13] и др. В представленных работах установлена существенная роль автотранспорта, режим его движения на уровень загрязнения воздушного бассейна, а также показаны прогностические возможности метеорологических параметров, влияющих на концентрацию загрязнения воздуха.

В трудах Л.М. Акимова [3], А.В. Назаренко [13] отмечена статистически значимая роль данных вертикального зондирования атмосферы с целью прогнозирования экологической обстановки, так как вертикальное перемешивание, вызванное турбулентными движениями, приводит к переносу по высоте всевозможных атмосферных примесей, водяного пара, количества движения и других свойств отдельных частиц.

Целью данной работы является установление связей между различными параметрами атмосферной турбулентности, описывающими вертикальное перемешивание воздуха, и величиной концентрации различных загрязняющих веществ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В городе Воронеже контроль загрязнения атмосферного воздуха на стационарных постах наблюдения осуществляет «Воронежский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» – филиал ЦГМС [1-3]. В городе Воронеже функционируют 5 стационарных постов наблюдения (ПНЗ), работающих по неполной программе /в системе Росгидромета/ сроков наблюдений в 7.00, 13.00, 19.00 часов, по 7 контролируемым антропогенным примесям. Станции 1, 8, 9, 10 –

«промышленные» (вблизи предприятий) и станция 7 – «авто». Стационарные посты и измеряемые на них концентрации загрязняющих веществ следующие: ПНЗ №1 (город Воронеж, улица Ростовская, 44) – формальдегид, сажа, пыль, диоксид азота, диоксид серы; ПНЗ №7 (город Воронеж, улица Лебедева, 2) – формальдегид, пыль, диоксид азота, диоксид серы; ПНЗ №8 (город Воронеж, улица Ворошилова, 30) – формальдегид, пыль, диоксид азота, диоксид серы; ПНЗ №9 (город Воронеж, улица Лидии Рябцевой, 51Б) – пыль, диоксид азота, диоксид серы; ПНЗ №10 (город Воронеж, улица 9 Января, 49) – формальдегид, пыль, диоксид азота, диоксид серы.

Пространственное распределение стационарных постов Воронежа наблюдения представлено на рисунке.

Точки месторасположения постов в правобережной части города расположены равномерно. В левобережной части выбраны в наиболее напряженной с экологической точки зрения зоне, вблизи «очага» аэротехногенного загрязнения, образованного крупными промышленными предприятиями. Низменный рельеф местности левобережья Воронежского водохранилища способствует снижению проветривающей способности и, как следствие, увеличению уровня загрязнения воздушного бассейна.

В качестве исходных данных использовались ежедневные данные по 5 стационарным постам наблюдения (ПНЗ), по трем срокам: 7.00, 13.00, 19.00, за 12 месяцев с 2018 по 2022 гг. и 6 месяцев 2023 года. Также использовались данные температурно-ветрового зондирования атмосферы ст. Воронеж (34122), передаваемые ежедневно каждые 6 часов в коде КН – 04 (FN-35) и размещенные на сайте Гидрометцентра России (<http://meteoinfo.ru>), за период синхронных ежедневных наблюдений за аналогичный период.

Распространение поллютантов в атмосфере происходит в результате их поступления и последующего переноса, существенно зависящего от распределения температуры воздуха с высотой, определяющей степень устойчивости атмосферы. Стабильность атмосферы зависит от её способности гасить вертикальное перемещение воздушных масс. В невозмущённой атмосфере вертикальное движение воздуха затруднено, а небольшие вертикальные возмущения гасятся и исчезают. В возмущённой атмосфере небольшие вертикальные перемещения воздуха имеют тенденцию к усилению, что ведёт к возникновению вихревых потоков и активной конвекции. Нестабильность



Рис. Схема расположения станций наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха в Воронеже
 [Fig. Scheme of the location of air pollution monitoring stations in Voronezh]

атмосферы всегда сопряжена со значительной турбулентностью.

Для оценки состояния атмосферы, степени турбулентности в ней, используются различные индексы неустойчивости, полученные на основе данных радиозондирования метеорологических характеристик на разных изобарических поверхностях.

В настоящей статье оценивается возможность применения индексов неустойчивости, используемых для прогноза конвективных опасных явлений, к прогнозу концентрации загрязняющих веществ.

Расчет исследуемых индексов неустойчивости основывается на данных температурно-ветрового зондирования атмосферы с использованием температуры воздуха, точки росы, давления и параметров ветра (сдвиг и скорость потока) на раз-

личных изобарических поверхностях. Наиболее часто применяются следующие.

1. Индекс потенциала грозы (*Showalter index*), Showalter (1947) [18]:

$$SI = T_{500} - T_{P_{500}}, \quad (1)$$

где T_{500} – температура воздушной массы, поднятой с 850 мб сухоадиабатически до уровня конденсации (LCL) и влажноадиабатически до 500 мб; $T_{P_{500}}$ – температура воздуха на уровне изобарической поверхности 500 мб.

2. Индекс плавучести (*Lifted Index, LI*), Galway (1956) [16], является широко используемой мерой стабильности, которая измеряет разницу между температурой единичного объема воздуха (посылки (*parcel*)) на высоте 500 мб и температурой

окружающей среды (*envir*) на высоте 500 мб. Рассчитывается как разность температур на уровне 500 гПа и температуры единичного объема воздуха (*parcel*) путем сухоадиабатического подъема, в сухом состоянии поднимающейся с уровня от земной поверхности до уровня ее конденсации (LCL), затем по влажноадиабатическому процессу во влажном состоянии до 500 мб:

$$LI = T(500mb\ envir) - T(500mb\ parcel), \quad (2)$$

где $T(500mb\ envir)$ – T (окружающая среда на 500 мб) – температура на высоте изобарической поверхности 500 гПа, °C; $T(500\ mb\ parcel)$ – T (посылка 500 мб) – температура восходящего единичного объема воздуха на уровне 500 гПа, °C.

3. *Индекс плавучести виртуальный (LIFT computed using virtual temperature)*. Предыдущий показатель, рассчитанный по виртуальной температуре. Виртуальная температура может быть рассчитана следующим образом:

$$t_v = t(1 + 0,608q) \text{ или } \Delta t_v = -0,608qt, \quad (3)$$

где – виртуальный добавок, °C; q – удельная влажность, г/кг.

Таким образом, виртуальная температура выше температуры сухого воздуха на значение виртуального добавка.

4. *Показатель сильной непогоды (SWEAT index)*, Miller (1972) [17]:

$$SW = 20(TT - 49) + 12D_{850} + 2V_{850} + V_{500} + 125[\sin(\Delta V_{500-850}) + 0,2], \quad (4)$$

где TT – *Total totals index* – индекс неустойчивости воздушной массы, (второй член уравнения приравнивают 0, если $TT \leq 49$), V_{850} и V_{500} – скорости ветра при давлении 850 мб и 500 мб соответствен-

но, ($\Delta V_{500-850}$) – разница в градусах между направлением ветра при давлении в 500 мб и направлением ветра при давлении 850 мб. Ни один из показателей в формуле не может быть отрицательным.

5. *Индекс неустойчивости Вайттинга (K index, Ki)*:

$$K_i = T_{850} + T_{500} + D_{850} - (T_{700} - D_{700}), \quad (5)$$

где Td_{850} и Td_{700} – температура точки росы при давлении в 850 и 700 мб, соответственно.

Первый член представляет собой член вертикального градиента температуры, в то время как второй и третий связаны с влажностью между 850 и 700 мб, и на них сильно влияет разброс температуры и точки росы на 700 мб.

6. *Перекрытый итоговый индекс (Cross totals index, CT)*:

$$CT = Td_{850} - T_{500}, \quad (6)$$

где Td_{850} – температура точки росы на 850 гПа, T_{500} – температура воздуха на 500 гПа.

Скорость вертикального подъема единичного объема воздуха (*parcel*) существенно зависит от влажности воздуха на уровне 850 гПа и температуры окружающей среды на высоте изобарической поверхности 500 гПа.

7. *Вертикальный итоговый индекс (Vertical totals index, VT)*, Miller (1972) [17]:

$$VT = T_{850} - T_{500}, \quad (7)$$

где T_{850} – температура воздуха на изобарической поверхности 850 гПа, T_{500} – температура воздуха на 500 гПа.

8. *Индекс итога итогов (перекрестный + вертикальный), (Total totals index TT)*, Miller (1972) [17]. Образуется из суммы двух индексов:

Таблица 1

Критериальные значения индексов устойчивости атмосферы
[Table 1. Criteria values of atmospheric stability indices]

Индекс неустойчивости / Index instability	Устойчивая атмосфера – турбулентность слабая / Sustainable atmosphere – turbulence is weak	Относительно устойчивая атмосфера – турбулентность умеренная / Relatively stable atmosphere – turbulence moderate	Абсолютно неустойчивая атмосфера – турбулентность сильная / Absolutely unstable atmosphere – turbulence is strong
SI (<i>Showalter index</i>)	≥ 0	$-3 \leq SI < 0$	$-4 < SI$
LI (<i>Lifted Index</i>)	≥ 0	$-3 \leq SI < 0$	$-9 < SI < -3$
SW (<i>SWEAT index</i>)	< 250	$250 \div 350$	≥ 350
Ki (<i>K index, Вайттинга</i>)	< 20	$20 \div 25$	> 25
CT (<i>Cross totals index</i>)	< 19	$20 \div 21$	> 22
VT (<i>Vertical totals index</i>)			> 28
TT (<i>Total totals index</i>)			> 30
CAPE	≤ 1000	$1000 \div 2500$	> 2500

$$TT = VT + CT, \quad (8)$$

где VT – вертикальный итоговый индекс, CT – перекрестный итоговый индекс.

9. Доступная конвективная потенциальная энергия Convective Available Potential Energy = CAPE (CAPE index) – отражает наличие в атмосфере определенного количества энергии, которое может использоваться для конвекции.

Критерии устойчивости/неустойчивости рассматриваемых индексов представлены в таблице 1.

С целью оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха использованы нормативы, представленные в СанПиН 1.2.3685 – 21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Неполная программа наблюдений используется для регистрации разовых концентраций. Критериальные значения контролируемых в Воронеже антропогенных примесей представлены в таблице 2.

Таблица 2

Предельно допустимая максимально разовая концентрация, мг/м³
[Table 2. Maximum permissible maximum single concentration, mg/m³]

Поллютанты / Pollutants	Пыль / Dust	Диоксид серы SO ₂ / Dioxide sulfur SO ₂	Оксид углерода CO / Oxide carbon CO	Диоксид азота NO ₂ / Dioxide nitrogen NO ₂	Оксид азота NO / Oxide nitrogen NO	Формальде- гид CH ₂ O / Formalde- hyde CH ₂ O	Сажа / Soot
Класс опасности	2	3	4	2	3	2	3
ПДК м.р.	0,15	0,5	5,0	0,085	0,4	0,035	0,15

Из анализа таблицы 3 следует, что в зимний период превышение максимально разовых концентраций ПДКм.р., наблюдаются только у двух поллютантов: у пыли и диоксида азота (NO₂). У остальных загрязнителей превышение концентраций выше установленного предела не наблюда-

лось, за исключением оксида углерода (CO, 1,1%) в утренние часы (07.00) на ПНЗ №7.

Наибольшие значения вероятности превышения ПДКм.р. в зимний сезон, наблюдаются на стационарных постах наблюдения ПНЗ №7 и ПНЗ №1 расположенных на левом берегу Воронежа

Таблица 3

Вероятность превышения ПДК м.р. в зимний сезон, %
[Table 3. Probability of exceeding of MPC m.s. in the winter season, %]

Срок 07.00 / Deadline 07.00	Пыль / Dust	Диоксид серы SO ₂ / Dioxide sulfur SO ₂	Оксид углерода CO / Oxide carbon CO	Диоксид азота NO ₂ / Dioxide nitrogen NO ₂	Оксид азота NO / Oxide nitrogen NO	Формальде- гид CH ₂ O / Formalde- hyde CH ₂ O	Сажа / Soot
ПНЗ							
№1	9,9	0,0	0,0	19,2	0,0	0,0	0,0
№7	12,6	0,0	1,1	36,3	0,0	0,0	-
№8	1,1	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	-
№9	3,3	0,0	0,0	7,7	0,0	-	-
№10	4,4	0,0	0,0	17,6	0,0	-	-
Срок 13.00 / Deadline 13.00	Пыль / Dust	Диоксид серы SO ₂ / Dioxide sulfur SO ₂	Оксид углерода CO / Oxide carbon CO	Диоксид азота NO ₂ / Dioxide nitrogen NO ₂	Оксид азота NO / Oxide nitrogen NO	Формальде- гид CH ₂ O / Formalde- hyde CH ₂ O	Сажа / Soot
ПНЗ / PNZ							
№1	17,6	0,0	0,0	34,6	0,0	0,0	0,0
№7	21,4	0,0	0,0	54,9	0,0	0,0	-
№8	1,1	0,0	0,0	7,7	0,0	0,0	-
№9	4,9	0,0	0,0	16,5	0,0	-	-
№10	8,8	0,0	0,0	37,4	0,0	-	-

в местах с большим потоком машин и наличием промышленных объектов, являющихся основными источниками аэротехногенного загрязнения города: ТЭЦ-1, ПАО ИЛ – «ВАСО», АО «Воронежсинтезкаучук», ЗАО «Воронежский шинный завод», а также на ПНЗ № 10, размещенном на улице (9 Января) с интенсивным движением автотранспорта.

Величина вероятности превышения ПДКм.р. имеет выраженный суточный ход, связанный с организационно-планировочной деятельностью города и его функциональной структурой, а именно административно-хозяйственной деятельностью. Основные административные центры Воронежа располагаются в центре города, следовательно, все потоки транспорта направлены туда. Наличие большого количества объектов малого бизнеса требует обычно использование личного транспорта, что увеличивает аэротехногенное загрязнение атмосферного воздуха в приземном слое в течение всего рабочего времени.

Вероятность превышения максимально разовых концентраций ПДКм.р. пыли в утренние часы (07.00) на ПНЗ № 1 составляет 9,9% и увеличивается в дневное время (13.00) практически в два раза до 17,6%.

На ПНЗ № 7 в утренние часы (07.00) показатель превышения концентрации пыли составляет 12,6% и повышается в дневное время до 21,4%.

Аналогичная ситуация наблюдается и на остальных постах наблюдения, за исключением ПНЗ № 8, где концентрация пыли в течение светлого

времени остается неизменной на низком уровне с вероятностью превышения концентрации 1,1%.

Увеличение концентрации пыли в дневное время обусловлено увеличением количества автотранспорта и усилением интенсивности движения на дорогах, способствующей, помимо прямых выбросов от автомобилей, ещё и поднятию вверх осевших частиц, за счет усиления турбулентности воздуха создаваемой движением транспорта.

Следует отметить, что картина распределения вероятности превышения ПДКм.р. диоксида азота аналогична с распределением для пыли, но уровень повторяемости значительно выше. Вероятность превышения ПДКм.р. диоксида азота в утренние часы (07.00) на ПНЗ № 1 составляет 19,2%, на ПНЗ № 7 – 36,3%, на ПНЗ № 10 – 17,6%. В дневное время (13.00), также как и у пыли, наблюдается практически двукратное увеличение вероятности превышения ПДКм.р. на ПНЗ № 1 до 34,6% (в 1,8 раза), ПНЗ № 7 – 54,9% (в 1,5 раза) и ПНЗ № 10 до 37,4% (в 2,1 раза).

Результаты наблюдений в летний сезон (июнь, июль, август) представлены в таблице 4.

Из анализа таблицы 4 следует, что в летнее время (июнь-август) количество загрязняющих веществ, превышающих предельно допустимый уровень, существенно возрастает, что позволяет сделать вывод о существенной роли термического фактора в формировании уровня загрязнения, а также наличии годового хода в распределении загрязняющих веществ.

Таблица 4

Вероятность превышения ПДК м.р. в летний сезон, %
[Table 4. Probability of exceeding of MPC m.s. in the summer season, %]

Срок 07.00 / Deadline 07.00	Пыль / Dust	Диоксид серы SO ₂ / Dioxide sulfur SO ₂	Оксид углерода CO / Oxide carbon CO	Диоксид азота NO ₂ / Dioxide nitrogen NO ₂	Оксид азота NO / Oxide nitrogen NO	Формальде- гид CH ₂ O / Formalde- hyde CH ₂ O	Сажа / Soot
ПНЗ / PNZ							
№1	8,8	0,0	0,6	30,9	0,0	10,5	0,0
№7	18,2	0,0	0,0	55,2	0,0	24,2	-
№8	0,6	0,0	0,0	11,0	2,8	4,5	-
№9	2,8	0,0	0,0	14,4	0,0	-	-
№10	4,4	0,0	0,0	28,7	0,0	-	-
Срок 07.00 / Deadline 07.00	Пыль / Dust	Диоксид серы SO ₂ / Dioxide sulfur SO ₂	Оксид углерода CO / Oxide carbon CO	Диоксид азота NO ₂ / Dioxide nitrogen NO ₂	Оксид азота NO / Oxide nitrogen NO	Формальде- гид CH ₂ O / Formalde- hyde CH ₂ O	Сажа / Soot
ПНЗ / PNZ							
№1	26,0	0,0	1,1	50,8	0,0	33,1	0,0
№7	47,0	0,0	1,1	83,4	0,0	54,9	-
№8	9,9	0,0	0,0	26,0	3,9	18,6	-
№9	13,3	0,0	0,0	37,6	0,0	-	-
№10	20,6	0,0	0,0	54,7	0,0	-	-

Наряду с пылью (47,0%) и диоксидом азота (83,4%), в летнее время наблюдается увеличение вероятности превышения максимально разовых концентраций ПДКм.р. в первую очередь у формальдегида (СН₂О) до 54,9% (ПНЗ № 7), а также незначительное увеличение (1,1%) в дневное время у оксида углерода (ПНЗ № 1 и № 7).

В суточном ходе концентраций загрязнителей наблюдается более существенная динамика. Так, на ПНЗ № 1 и ПНЗ № 7 в течение дня происходит практически 2,5 – 3,0-х кратное увеличение повторяемости превышения ПДК м.р. пыли с 8,8% (07.00) до 26,0% (13.00) на ПНЗ № 1, а также с 18,2% (07.00) до 47,0% (13.00) на ПНЗ № 7.

На остальных стационарных пунктах наблюдения динамика суточного роста более существенная. Так, если утром (07.00) на ПНЗ № 8 повторяемость превышения концентрации пыли выше ПДКм.р. составляет 0,6%, то днем (13.00) она увеличивается в 16,5 раз до 9,9%. На ПНЗ № 9 наблюдается практически 5-ти кратное увеличение превышения ПДКм.р. от 2,8% (07.00) до 13,3% (13.00). Аналогичная 5-ти кратная динамика роста повторяемости преодоления границы ПДКм.р. наблюдается на ПНЗ № 10 – от 4,4% в 07.00 до 20,6% в 13.00.

Летом в Воронеже, очень высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота, особенно на левом берегу (ПНЗ № 1 и ПНЗ № 7) и на правом берегу, на улице 9 Января (ПНЗ № 10). В утренние часы (07.00), практически каждый третий случай измерений превышает максимально разовые значения ПДК м.р. на ПНЗ № 1 (30,9%) и ПНЗ № 10 (28,7%), а на ПНЗ № 7 практически каждый второй случай (55,2%). В дневное время (13.00), вероятность превышения ПДК м.р. диоксидом азота составляет 83,4% на ПНЗ № 7, на ПНЗ № 1 – 50,8%, ПНЗ № 10 – 54,7% и ПНЗ № 9 – 37,6%. В самом благоприятном участке города Воронежа, в районе расположения ПНЗ № 8, превышение концентрации ПДКм.р. диоксидом азота днем (13.00) составляет 26,0%.

Канцерогенно опасное вещество – формальдегид – в анализе загрязнения воздушной среды города Воронежа представляет особый интерес, особенно летом, так как в холодное время года случаев превышения максимально разовых значений ПДКм.р. выше критериальных значений не наблюдалось. На всех стационарных пунктах наблюдения, как утром (07.00) так и днем (13.00), наблюдаются превышение ПДКм.р. формальдегида увеличивающееся днем, на ПНЗ № 1 от 10,5% до 33,1% (в 3.1

раза), на ПНЗ № 7 от 24,2% до 54,9% (в 2,3 раза) и на ПНЗ № 8 от 4,5% до 18,6% (в 4,1 раза).

Практически 4-х кратное увеличение числа случаев превышения ПДКм.р. формальдегида на ПНЗ № 8 объясняется большим потоком машин на Московском проспекте, увеличивающим концентрацию формальдегида. Плотная застройка в районе размещения ПНЗ создает скопление и застой воздуха. Молекулярная масса у формальдегида (30,03 г/моль) больше, чем у воздуха (28,98 г/моль), что способствует увеличению концентрации формальдегида в приземном слое атмосферы.

На втором этапе исследования, для выявления взаимосвязи между параметрами устойчивости атмосферы и концентрациями поллютантов, использовался корреляционный метод анализа, отличительной особенностью которого является приближенный, вероятностный характер. Качественная оценка показателей тесноты связи осуществлялась на основании шкалы Чеддока [17], согласно которой величина тесноты корреляционной связи $|r|$ в интервале 0,1-0,3 характеризует слабую связь; 0,3-0,5 – умеренную; 0,5-0,7 – заметную; 0,7-0,9 – высокую и 0,9-0,99 – весьма высокую.

Полученные значения коэффициентов корреляции были проверены на значимость с помощью коэффициента линейной корреляции Пирсона, после предварительной процедуры проверки исследуемых параметров на «нормальность» распределения. Полученные результаты подтвердили свою значимость.

Анализ тесноты связи между параметрами устойчивости атмосферы и концентрациями поллютантов осуществлялся отдельно для зимнего и летнего сезонов по всем стационарным пунктам наблюдения в утренние и дневные часы одновременно. В результате для каждого поллютанта были отобраны наибольшие величины тесноты корреляционной связи $|r|$ с различными индексами устойчивости атмосферы, представленные в таблице 5 (зимний сезон) и таблице 6 (летний сезон).

Следует отметить, что в таблицах 5 и 6, представлены значения коэффициентов корреляции, соответствующие тесноте связи «умеренная» и выше, то есть $|r| > 0,3$. В случаях, если наблюдалась теснота связи слабая или отсутствовала, то ставился прочерк.

Анализ результатов таблицы 5 позволил установить, что зависимость концентрации загрязняющих веществ от устойчивости атмосферы, а, следовательно, и от ее турбулентности в зимний период имеет умеренную связь, и колеблется в пределах $|r|$

от 0,34 до 0,48 и только теснота связи оксида азота с индексом SI (*Showalter index*) составляет 0,52, что соответствует уровню заметной связи.

Такие значения величины коэффициентов корреляции свидетельствуют о том, что необходимы дополнительные исследования временных особенностей индексов устойчивости и состояния атмосферы, так как многие исследуемые поллютанты тяжелее воздуха и при устойчивой атмосфере слабая турбулентность оказывает недостаточно значительное влияние на концентрацию загрязняющих веществ.

Предложенная гипотеза об устойчивости атмосферы в зимний период подтверждается результатами корреляционного анализа в летний период.

Из анализа таблицы 6 видно, что уровень тесноты корреляционной связи между параметрами устойчивости атмосферы и загрязняющими веществами выше, чем зимой. В летний период, за счет большего притока тепла, увеличивается термический режим подстилающей поверхности, что способствует усилению конвекции в приземном слое атмосферы, а, следовательно, и интенсивному турбулентному перемешиванию воздуха. Величина корреляционной связи во многих случаях достигает заметного уровня, а для пыли и формальдегида с индексом *CAPE* она высокая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований выявлена зависимость величины загрязняющих веществ от

Таблица 5

Величина корреляционной связи в зимний период
[Table 5. Correlation value in winter period]

Индекс устойчивости / Sustainability index	Пыль / Dust	Диоксид серы / Sulfur dioxide	Оксид углерода / Oxide carbon	Диоксид азота / Dioxide nitrogen	Оксид азота / Nitric oxide
SI (<i>Showalter index</i>)	–	–	0,45	0,34	0,52
LI (<i>Lifted Index</i>)	0,48	–	-0,35	0,37	0,39
LIFT computed using virtual temperature:	0,48	–	-0,35	0,37	0,39
SW (<i>SWEAT index</i>)	-0,38	0,30	–	–	–
Ki (<i>K index, Вайтунга</i>)	–	–	-0,38	-0,39	–
CT (<i>Cross totals index</i>)	–	-0,34	-0,38	-0,34	-0,38
VT (<i>Vertical totals index</i>)	–	-0,34	–	–	–
TT (<i>Total totals index</i>)	–	-0,34	-0,43	–	-0,44
CAPE	–	–	–	–	–

Таблица 6

Величина корреляционной связи в летний период
[Table 6. Correlation value in summer period]

Индекс устойчивости / stability index	Пыль / Dust	Диоксид серы / Sulfur dioxide	Оксид углерода / Oxide carbon	Диоксид азота / Dioxide nitrogen	Диоксид азота / Nitric oxide	Формальдегид / Formaldehyde	Сажа / Soot
SI (<i>Showalter index</i>)	0,55	0,33	-0,39	-0,30	–	-0,45	–
LI (<i>Lifted Index</i>)	0,47	-0,37	-0,44	-0,40	–	-0,44	–
LIFT computed using virtual temperature:	0,50	-0,37	-0,45	-0,40	–	-0,45	–
SW (<i>SWEAT index</i>)	-0,46	–	–	–	-0,33	–	-0,32
Ki (<i>K index, Вайтунга</i>)	0,51	-0,34	0,33	0,31	-0,31	0,35	0,45
CT (<i>Cross totals index</i>)	-0,35	-0,39	0,31	-0,31	-0,32	-0,52	–
VT (<i>Vertical totals index</i>)	0,51	0,31	0,36	0,46	–	0,38	0,43
TT (<i>Total totals index</i>)	-0,42	-0,38	0,39	–	-0,31	-0,40	–
CAPE	0,79	–	0,57	0,33	–	0,80	–

организационно-планировочной структуры города и его функциональной организации, а именно: административно-хозяйственной деятельности, способствующей наличию большого количества личного транспорта в течение всего дня. Наибольшая загрязненность воздуха наблюдается на левом берегу (ПНЗ № 1 и ПНЗ № 7) с плотным автомобильным потоком и развитой промышленностью, особенно летом.

Установлен суточный и годовой ход концентрации загрязняющих веществ на различных стационарных пунктах наблюдения города Воронежа, зависящий в первую очередь от состояния атмосферы и термического режима подстилающей поверхности. Основными загрязнителями атмосферы Воронежа являются пыль и диоксид азота, летом добавляется формальдегид. Вероятность превышения ПДК_{м.р.} формальдегида летом составляет 54,9%, которая увеличивается в два раза с утра к полудню. Зимой случаев вероятности превышения ПДК м.р. формальдегида не наблюдалось.

Доказана целесообразность использования индексов устойчивости атмосферы для прогноза концентрации загрязняющих веществ. Величина корреляционной связи летом выше, чем зимой. Корреляционная связь $|r|$ между концентрациями загрязняющих веществ и индексами устойчивости атмосферы, летом достигает заметного уровня ($r = 0,45-0,55$), а для пыли и формальдегида с индексом САРЕ она высокая ($r = 0,79$ и $r = 0,80$, соответственно).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов Л. М. Анализ временного распределения средних концентраций антропогенных примесей в г. Воронеже с учетом климатических показателей // *Экология регионов: сборник материалов III юбилейной Международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры экологии Владимирского государственного университета*, 2010, с. 8-12.
2. Акимов Л. М., Виноградов П. М., Акимов Е. Л. Анализ влияния функционально-планировочной структуры города на загрязнение воздушного бассейна // *Экологическая оценка и картографирование состояния городской среды*, 2014, с. 55-65.
3. Акимов Л. М., Якушев А. Б., Куролап С. А. Геоэкологическая оценка загрязнения воздушного бассейна города Воронежа автотранспортом в зависимости от состояния атмосферы // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2011, № 2, с. 158-165.
4. Безуглая Э. Ю. *Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1980. 184 с.
5. Безуглая Э. Ю., Расторгуева Г. П., Смирнова И. В. *Чем дышит промышленный город*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. 256 с.

6. Берлянд М. Е. *Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
7. Буштуева К. С. Состояние проблемы санитарной охраны атмосферного воздуха и перспективы ее решения // *Руководство по гигиене атмосферного воздуха*, 1976, с. 56-58.
8. Городской микроклимат, загрязнение атмосферы и риск для здоровья населения города Воронежа / С. А. Куролап, С. А. Епринцев, О. В. Клепиков, Ю. Н. Барвитенко // *Актуальные проблемы географии и геоэкологии: электронное научное периодическое издание*, 2009, вып. 1 (5), с. 1-13.
9. Израэль Ю. А. *Экология и контроль состояния природной среды*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. 380 с.
10. Исаев А. А. *Экологическая климатология*. Москва: Издательство Научный мир, 2003. 470 с.
11. Костылева Л. Н., Корыстин С. И., Куролап С. А. Экологическая оценка сезонной динамики загрязнения воздушного бассейна города Воронежа // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2009, № 2, с. 107-113.
12. Мамчик Н. П., Клепиков О. В., Куролап С. А. *Оценка риска для здоровья населения при техногенном загрязнении городской среды*. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2006. 220 с.
13. Назаренко А. В., Дьяков С. А. Исследование уровня загрязнения воздуха г. Воронежа при использовании аэросиноптического материала // *Высокие технологии в экологии: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции*, 2003, с. 41-45.
14. Чубирко М. И., Стёпкин Ю. И. *Доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия в городском округе город Воронеж в 2013 году»*. Воронеж: Управление Роспотребнадзора по Воронежской области, 2014. 107 с.
15. Chaddock R. E. *Principles and methods of statistics*. Boston, New York, [etc.]. 1925. 471 p.
16. Galway J. G. The lifted index as a predictor of latent instability // *Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS)*, 1956, pp. 528-529.
17. Miller R. C. *Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central*. Tech. Rept. 200 (R). Headquarters, Air Weather Service, USAF, 1972. 190 p.
18. Showalter A. K. A stability index for forecasting thunderstorms // *Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS)*, 1947, no. 34, pp. 250-252.
19. Turiel I. *Indoor air pollution*. Stanford University Press. Stanford, CA. 1985. 124 p.
20. Wilson R. Simple Area Source Algorithm for Risk Assessment Screening // *Memorandum to P. Cirrone*, 1990, pp. 135-137.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию 05.07.2023

Принята к публикации 04.09.2023

Assessment of the Role of Meteorological Conditions in the Formation of Aerotechnogenic Pollution of Urban Environment

L. M. Akimov ✉, E. L. Akimov

Voronezh State University, Russian Federation
(1, Universitetskaya sq., Voronezh, 394018)

Abstract: The purpose of the article was to establish relationships between different atmospheric turbulence parameters describing the vertical mixing of air and pollutant concentrations.

Materials and methods of the study are based on the analysis of data of stationary observation posts on the concentration of pollutants, as well as data of temperature and wind sounding of the atmosphere of Voronezh. Atmospheric stability indices were calculated and their criterion values of atmospheric stability were established. Correlation analysis was used to determine the closeness of relationships between the parameters of atmospheric stability and pollutants.

The results of the study were the establishment of spatial and temporal patterns of pollutant distribution, as well as the identification of the dependence of their concentration on the stability of the atmosphere. The highest air pollution is observed on the left bank of the Voronezh reservoir, especially in summer, with dense automobile traffic and developed industry. The probability of exceeding of MPC m.s. in summer time for dust amounted to 47,0%, for nitrogen dioxide 83,4%. In summer, an increase in the probability of exceedance of MPC m.s. concentrations of formaldehyde (CH₂O) up to 54,9% is also observed. In winter, no exceedance of MPC m.s. of formaldehyde is observed, which indicates the dependence of CH₂O concentration on temperature and indicates an annual course.

Conclusions. The feasibility of using atmospheric stability indices for forecasting pollutant concentrations has been proved. The correlation between pollutant concentrations and atmospheric stability indices in summer reaches an appreciable level ($r = 0,45 - 0,55$), and for dust and formaldehyde with CAPE index it is high and reaches values 0,79 and 0,80, respectively.

Key words: stability indices, atmospheric stability, turbulence, concentration, pollutants, probability, correlation.

Funding: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 20-17-00172, <https://rscf.ru/project/20-17-00172/>

For citation: Akimov L.M., Akimov E.L. Assessment of the Role of Meteorological Conditions in the Formation of Aerotechnogenic Pollution of Urban Environment. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geo-grafia. Geoekologia*, 2023, no. 3, pp. 68-78. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/3/68-78>

REFERENCES

1. Akimov L.M. Analiz vremennogo raspredeleniya srednikh kontsentratsiya antropogennykh primesey v g. Voronezhe s uchetom klimaticheskikh pokazateley [Analysis of the time distribution of average concentrations of anthropogenic impurities in Voronezh, taking into account climatic indicators]. *Ekologiya regionov: sbornik materialov III yubileynoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 20-letiyu kafedry ekologii Vladimirskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, pp. 8-12. (In Russ.)
2. Akimov L.M., Vinogradov P.M., Akimov E.L. Analiz vliyaniya funktsional'no-planirovochnoy struktury goroda na zagryaznenie vozdušnogo basseyna [Analysis of the influence of the functional and planning structure of the city on the pollution of the air basin]. *Ekologicheskaya otsenka i kartografirovanie sostoyaniya gorodskoy sredy*, 2014, pp. 55-65. (In Russ.)
3. Akimov L.M., Yakushev A.B., Kurolap S.A. Geoekologicheskaya otsenka zagryazneniya vozdušnogo basseyna goroda Voronezha avtotransportom v zavisimosti ot sostoyaniya atmosfery [Geoecological assessment of pollution



of the air basin of the city of Voronezh by motor transport, depending on the state of the atmosphere]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 2011, no. 2, pp. 158-165. (In Russ.)

4. Bezuglaya E. Yu. *Meteorologicheskii potentsial i klimaticheskie osoben-nosti zagryazneniya vozdukha gorodov* [Meteorological potential and climatic features of urban air pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980. 184 p. (In Russ.)

5. Bezuglaya E. Yu., Rastorgueva G. P., Smirnova I. V. *Chem dyshit promyshlennyi gorod* [What the industrial city breathes]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. 256 p. (In Russ.)

6. Berlyand M. E. *Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery* [Fore-cast and regulation of atmospheric pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 272 p. (In Russ.)

7. Bushtueva K. S. Sostoyanie problem sanitarnoy okhrany atmosfernogo vozdukha i perspektiv yee resheniya [The state of the problem of sanitary protection of atmospheric air and prospects for its solution]. *Rukovodstvo po gigiyene atmosfernogo vozdukha*, 1976, pp. 56-58. (In Russ.)

8. Gorodskoy mikroklimat, zagryaznenie atmosferyi risk dlya zdo-rov'ya naseleniya goroda Voronezha [Urban microclimate, atmospheric pollution and the risk to the health of the population of the city of Voronezh] / S.A. Kurolap, S.A. Eprintsev, O. V. Klepikov, Yu. N. Barvitenko. *Aktual'nye problem geografii i geoekologii: elektronnoe nauchnoe periodicheskoe izdanie*, 2009, v. 1 (5), pp. 1-13. (In Russ.)

9. Izrael' Yu. A. *Ekologiya i kontrol' sostoyaniya prirodnoy sredy* [Ecology and control of the state of the natural environment]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984. 380 p. (In Russ.)

10. Isaev A. A. *Ekologicheskaya Klimatologiya* [Environmental climatolo-gy]. Moscow: Izdatel'stvo Nauchnyy Mir, 2003. 470 p. (In Russ.)

11. Kostyleva L. N. Korystin S. I., Kurolap S. A. *Ekologicheskaya otsenka sezonnoy dinamiki zagryazneniya vozduhnogo basseyna goroda Vor-onezha* [Ecological assessment of seasonal dynamics of pollution of the air basin of the city of Voronezh]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 2009, no. 2, pp. 107-113. (In Russ.)

Акимов Леонид Мусамудинович

кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой природопользования факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-0749-1976, e-mail: akl63@bk.ru

Акимов Евгений Леонидович

кандидат географических наук, преподаватель кафедры природопользования факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-4909-4290

12. Mamchik N. P., Klepikov O. V., Kurolap S. A. *Otsenka riska dlya zdo-rov'ya naseleniya pri tekhnogennom zagryaznenii gorodskoy sredy* [Assessment of the risk to public health from technogenic pollution of the urban environment]. Voronezh: *Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet*, 2006. 220 p. (In Russ.)

13. Nazarenko A. V., D'yakov S. A. *Issledovanie urovnya zagryazneniya vozdukha g. Voronezha pri ispol'zovanii aerosinopticheskogo materiala* [Investigation of the level of air pollution in Voronezh using aerosynoptic material]. *Vysokie tekhnologii v ekologii: sbornik materialov VI Mezhdunarodnoy-nauchno-prakticheskoy konferentsii*, 2003, pp. 41-45. (In Russ.)

14. Chubirko M. I. Stepkin Yu. I. *Doklad «O sostoyanii sanitarno-epidemiologicheskogo blagopoluchiya v gorodskom okruge gorod Voronezh v 2013 godu»* [Report "On the state of sanitary and epidemiological well-being in the Voronezh City District in 2013"]. Voronezh: Upravlenie Rospotrebnadzora po Voronezhskoy oblasti, 2014. 107 p. (In Russ.)

15. Chaddock R. E. *Principles and methods of statistics*. Boston, New York, [etc.]. 1925. 471 p.

16. Galway J. G. The lifted index as a predictor of latent instability. *Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS)*, 1956, pp. 528-529.

17. Miller R. C. *Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central*. Tech. Rept. 200 (R). Headquarters, Air Weather Service, USAF, 1972. 190 p.

18. Showalter A. K. A stability index for forecasting thunder-storms. *Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS)*, 1947, no. 34, pp. 250-252.

19. Turiel I. *Indoor air pollution*. Stanford University Press. Stanford, CA. 1985. 124 p.

20. Wilson R. Simple Area Source Algorithm for Risk Assessment Screening. *Memorandum to P. Cirrone*, 1990, pp. 135-137.

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 05.07.2023

Accepted: 04.09.2023

Leonid M. Akimov

Cand. Sci. (Geogr.), Assoc. Prof., Head of the Department of Nature Management, Faculty of Geography, Geoecology and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, ORCID: 0000-0003-0749-1976, e-mail: akl63@bk.ru

Evgeniy L. Akimov

Cand. Sci. (Geogr.), Lecturer at the Department of Nature Management, Faculty of Geography, Geoecology and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, ORCID: 0000-0003-4909-4290