

---

**МЕТЕОРОЛОГИЯ / METEOROLOGY**

---

УДК: 504.3.054

**ЗАВИСИМОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ОКСИДА УГЛЕРОДА ОТ  
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОЙ  
АКТИВНОСТИ В Г. ТАШКЕНТЕ****М.Л. АРУШАНОВ<sup>1\*</sup>, М. АЛАУТДИНОВ<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, miklarushanov@rambler.ru<sup>2</sup> Национальный Университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека

**Аннотация.** В статье рассмотрена статистическая структура временной изменчивости оксида углерода (СО). Исследована зависимость влияния метеорологических величин (температура, относительная влажность, давление, скорость ветра) и вариаций солнечной активности (числа Вольфа) на изменчивость его концентрации в г. Ташкенте, как функции месяца года. Выявлены месяцы года с значимой корреляцией между СО и метеорологическими величинами.

Рассчитан спектр колебаний концентраций оксида углерода по 30-летней выборке (1991-2020 гг.). Получены главные составляющие спектра с периодом колебаний 0,5, 1, 2,8, 4, 8 и 30 лет. Исследована причинная связь между концентрацией СО и рассматриваемыми метеорологическими величинами и числами Вольфа. Получена причинная обусловленность вариаций концентрации СО в г. Ташкенте от метеорологических факторов и отсутствие таковой от вариаций солнечной активности.

**Ключевые слова:** оксид углерода, метеорологические величины, кросскорреляция, спектр колебаний, функция причинности, вейвлет функция.

**Введение.** Проблема загрязнения воздуха в городах планеты в связи с наблюдаемым глобальным положительным трендом температуры в XXI веке приобрела особую значимость. Пространственно-временная изменчивость примесей в атмосфере, помимо интенсивного антропогенного воздействия на качество воздуха в городах, в сильной степени зависит от метеорологических условий того или иного региона со своими географическими особенностями. По данным [Боков и др., 2006] изменчивость примесей в атмосфере под воздействием метеорологических факторов составляет 70%. В частности, в Ташкенте на фоне глобального потепления, тенденции усиления темпов опустынивания и, как следствие, повышения концентрации естественных пылевых выносов, антропогенного фактора (увеличения промышленных предприятий, автомобилей) значительно возросло количество выбросов примесей в атмосферу города. Согласно оценкам ВОЗ [Загрязнение ...] в 2019 г. загрязнение атмосферного воздуха в городах планеты стало причиной преждевременной смерти 4,2 млн человек во всём мире.

Особое место из загрязняющих атмосферу примесей занимает оксид углерода (СО, угарный газ, монооксид углерода и т.п.). При ограниченной в городах достаточной естественной вентиляции, являясь токсичной примесью, СО может достигать высоких концентраций в атмосфере города, оказывая пагубное влияние на здоровье человека. Играя важную роль в фотохимических процессах, оксид углерода во многом определяет

---

<sup>1\*</sup> Ответственный автор: mikl-arushanov@rambler.ru, тел. +998 90 9976146

концентрации других важных примесей, имеющих отношение к глобальным изменениям атмосферы, и является индикатором глобальных изменений.

В городах важную роль в образовании СО играют процессы неполного сгорания топлива в автомобильных двигателях. Вклад автотранспорта в загрязнение атмосферы городов СО составляет 45-75% от его общего бюджета антропогенного происхождения [Созонтова, Пепина, 2017].

В работе [Алаутдинов, 2024] на основе анализа распределения концентрации оксида углерода по 12 опорным постам наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха в г. Ташкенте построена карта-схема распределения оксида углерода и выявлены локации с относительно повышенным содержанием загрязняющего вещества. В данной статье с использованием базы данных СО для Ташкента, описанной в указанной работе, исследуется временная статистическая структура СО, изменчивость его концентрации под воздействием метеорологических величин.

**Цель работы.** Исследовать временную статистическую структуру оксида углерода по данным 12 постов в г. Ташкенте, получить спектр колебаний СО в диапазоне 30-летней выборки, определить особенности влияния метеорологических факторов и вариаций солнечной активности на концентрацию СО и выявить наличие (отсутствие) причинной обусловленности концентрации оксида углерода вариациями солнечной активности.

**Постановка задачи.** Одной из информативных характеристик динамики исследуемой переменной  $X$  является её среднее  $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$ . на заданном интервале времени. Другой важной характеристикой изменчивости исследуемой переменной служит дисперсия  $\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2$ , рассчитанная по заданной выборке. И в том и другом случае выборочные значения отличаются от значений в генеральной совокупности. Величина такого различия определяется длиной исследуемого ряда. В метеорологии за базовый период принят 30-ти летний ряд, среднее которого принимается за норму.

Статистическая связь между двумя переменными  $X$  и  $Y$  определяется кросскорреляцией, показывающей тесноту связи между переменными:

$$R_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 (Y_i - \bar{Y})^2}}. \quad (1)$$

Индивидуальный спектр колебаний (спектральная плотность) исследуемого временного ряда рассчитывается как преобразование Фурье автокорреляционной функции времени [Дженкинс, Ватс, 1972]:

$$S(f) = 2 \left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^{T-1} r(k) w(k) \cos(2\pi f k) \right], \quad 0 \leq f \leq \frac{1}{2}, \quad (2)$$

где  $R(k) \equiv R_{xx}(k)$  – автокорреляционная функция времени;  $w(k)$  – корреляционное окно (сглаживающие веса), определённое в дискретные моменты времени  $u=k\Delta$ ,  $k=1,2,\dots,T$ ,  $\Delta$  – шаг дискретности,  $f$  – частота.

В отличие от преобразования Фурье, вейвлет анализ позволяет проследить степень устойчивости колебаний во времени на фиксированной частоте.

Амплитудная вейвлет-функция  $W(a,b)$  (в случае дискретного преобразования) рассчитывается по формуле [Арушанов, 2015]:

$$W(a,b) = \frac{1}{n(a,b)} \sum_{k=0}^{N-1} f_k(t) G^* \left( \frac{t_k - b}{a} \right), \quad (3)$$

где  $f(t)$  – исследуемая функция,  $G^*(t)$  – «материнская» вейвлет-функция («звёздочка» означает комплексное сопряжение),  $a, b$  коэффициенты масштаба и сдвига, соответственно,

$$t - \text{время}, \quad n(a,b) = \sum_{k=0}^{N-1} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t_k - b}{a} \right)^2}.$$

Решение одной из поставленных задач, а именно, наличие (отсутствие) причинной обусловленности концентрации оксида углерода вариациями солнечной активности выполняется на основе теории причинного анализа [Арушанов, Коротаев, 1994]. Согласно теории причинного анализа, вычисляется функция причинности

$$\Upsilon = \frac{i_{Y|X}}{i_{X|Y}}, \quad 0 \leq \Upsilon \leq \infty, \quad (4)$$

где  $i_{Y|X} = \frac{H(Y|X)}{H(Y)}$ ,  $i_{X|Y} = \frac{H(X|Y)}{H(X)}$ ,  $0 \leq i \leq 1$  – независимости процесса  $Y$  от  $X$  и процесса  $X$  от  $Y$ ,  $H(x)$ ,  $H(Y)$  – безусловные и  $H(Y|X)$ ,  $H(X|Y)$  условные энтропии соответствующих процессов.

Если  $\Upsilon < 1$ , то функция находится в области нормальной причинности (процесс  $X$  является причиной, а процесс  $Y$  – следствием); если  $\Upsilon > 1$  – функция находится в области обращённой причинности (процесс  $Y$  – причина, процесс  $X$  – следствие); при  $\Upsilon = 1$  – процессы причинной зависимостью не связаны.

**Материалы и методы исследования.** Использованы данные о содержании среднемесячных значений оксида углерода ( $\text{мг/м}^3$ ), осреднённые по 12 постам г. Ташкента за 30-ти летний период времени (1991-2020 гг.), среднемесячные значения температуры, давления, относительной влажности, скорости ветра, индекса солнечной активности – числа Вольфа, за тот же период. Данные CO по 12 постам г. Ташкента взяты из архива Узгидромета, а числа Вольфа с сайта Астронет: <https://www.astronet.ru/db/msg/1163053>.

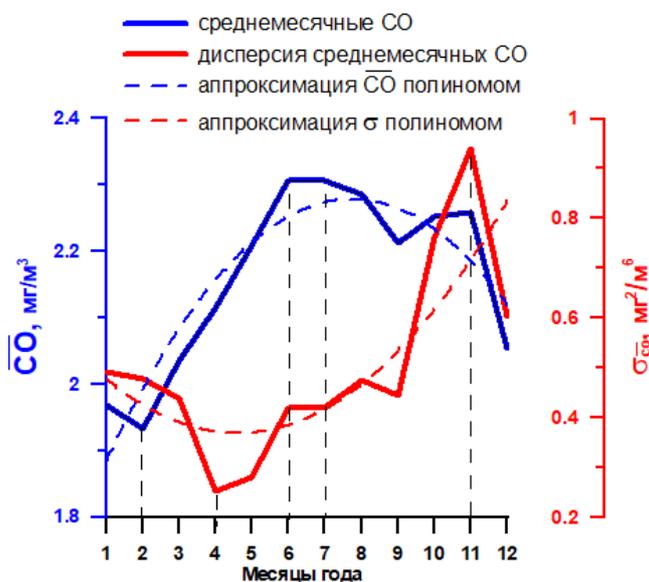
**Анализ результатов.** На рис. 1 приведен годовой ход среднемесячных значений и дисперсии концентрации оксида углерода. На рис.1 видно, что концентрация CO максимальна в летние месяцы – июнь, июль, что является очевидным результатом, ибо в это время наиболее характерными из синоптических процессов Средней Азии являются малоградиентное поле пониженного и повышенного давления, иногда переходящие в термическую депрессию, продолжающуюся, как правило, 2-3 суток [Иногамова, Мухтаров, 2002]. Этим процессам характерна сухая, жаркая погода без осадков.

Минимальное значение среднемесячной концентрации CO приходится на февраль, т.е. зимний месяц с частыми, как правило, осадками и неустойчивой погодой, когда преобладают северо-западные, западные вторжения и выходы южных циклонов (южно-каспийский, мургабский, верхнеамударьинский), а также волновая деятельность [Иногамова, Мухтаров, 2002], благоприятствующие удалению примесей из атмосферы.

Минимальные и максимальные значения дисперсии среднемесячной концентрации CO приходятся на апрель и ноябрь месяцы, соответственно.

В целом концентрации оксида углерода увеличиваются от зимы к лету и уменьшаются от лета к осени. Противоположный годовой ход имеет его дисперсия – уменьшение к лету и увеличение к зиме. Интересно отметить, что прямо противоположный

результат, касаемо годового хода оксида углерода, получен в работе [Людчик и др., 2022]. Эти два результата прямо указывают на очевидную зависимость, помимо метеорологических факторов, годового хода концентрации CO от физико-географических условий.



**Рис. 1. Годовой ход средней за тридцатилетия (1991-2020 гг.) среднемесячной концентрации CO и её дисперсии в г. Ташкенте**

**Fig. 1. Annual variation of the thirty-year (1991-2020) average monthly CO concentration and its variance in Tashkent**

Для выявления связи метеорологических факторов на концентрацию оксида углерода в атмосфере города Ташкента были рассчитаны кросскорреляционные матрицы оксида углерода и указанных выше метеорологических величин и чисел Вольфа. Сразу отметим, что в отличие от диоксида углерода, который имеет значимую корреляцию с вариациями солнечной активности (числа Вольфа) [Arushanov, Alautdinov, 2024], оксид углерода такой зависимости не имеет. Это объясняется малым периодом естественной «жизни» углерода в атмосфере – около 35 суток [Зобнина, 2011]. Что касается метеорологических величин, то из рассмотренных в данной работе, значимая корреляция проявляется с относительной влажностью, температурой и скоростью ветра (табл. 1-3), а корреляция с приземным давлением отсутствует.

Исходя из значимых коэффициентов кросскорреляционных матриц (затемнённые ячейки) вырисовывается картина с наличием периодической составляющей (составляющих) в спектре колебаний оксида углерода. Для выяснения этого вопроса был рассчитан его спектр колебаний (2), приведённый на рис. 2. Для этого, сначала была построена автокорреляционная функция (рис. 2a), как функция временного сдвига, затем спектральная плотность (рис. 2b), как преобразование Фурье автокорреляционной функции.

Как и следовало ожидать, в спектре  $\overline{CO}$  проявляются три максимума спектральной плотности с периодами 6, 12 и 30 месяцев, т.е. полугодовой, годичный и 2,8 лет. Если первые два периода вполне объяснимы, то период 2,8 лет, по-видимому, связан с

квазидвухлетней цикличностью общей циркуляции атмосферы [Хайруллина, Астафьева, 2011].

**Таблица 1**  
**Кросскорреляционная матрица относительной влажности и оксида углерода**  
**Table 1**

**Cross-correlation matrix of relative humidity and carbon monoxide**

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
I	<u>0,15</u> 0,19	<u>0,24</u> 0,18	<u>0,05</u> 0,19	<u>0,06</u> 0,19	<u>0,05</u> 0,19	<u>0,13</u> 0,19	<u>0,03</u> 0,19	<u>0,03</u> 0,19	<u>0,07</u> 0,19	<u>0,16</u> -0,19	<u>0,23</u> 0,18	<u>0,19</u> 0,19
II	<u>-0,08</u> 0,19	<u>-0,17</u> 0,19	<u>-0,10</u> 0,19	<u>-0,03</u> 0,19	<u>-0,11</u> 0,19	<u>-0,01</u> 0,19	<u>-0,12</u> 0,19	<u>-0,12</u> 0,19	<u>0,01</u> 0,19	<u>-0,06</u> 0,19	<u>0,03</u> 0,19	<u>0,10</u> 0,19
III	<u>0,34</u> 0,17	<u>0,29</u> 0,18	<u>0,35</u> 0,17	<u>0,29</u> 0,18	<u>0,17</u> 0,19	<u>0,17</u> 0,19	<u>0,07</u> 0,19	<u>0,07</u> 0,19	<u>0,32</u> 0,17	<u>0,32</u> 0,17	<u>0,38</u> 0,17	<u>0,39</u> 0,16
IV	<u>0,18</u> 0,19	<u>0,23</u> 0,18	<u>0,33</u> 0,17	<u>0,30</u> 0,17	<u>0,30</u> 0,18	<u>0,22</u> 0,18	<u>0,46</u> 0,15	<u>0,46</u> 0,15	<u>0,40</u> 0,16	<u>0,25</u> 0,18	<u>0,19</u> 0,19	<u>-0,01</u> 0,19
V	<u>0,37</u> 0,17	<u>0,40</u> 0,16	<u>0,40</u> 0,16	<u>0,37</u> 0,17	<u>0,29</u> 0,18	<u>0,38</u> 0,16	<u>0,37</u> 0,16	<u>0,37</u> 0,17	<u>0,47</u> 0,15	<u>0,43</u> 0,16	<u>0,44</u> 0,15	<u>0,25</u> 0,18
VI	<u>0,30</u> 0,18	<u>0,30</u> 0,17	<u>0,33</u> 0,17	<u>0,25</u> 0,18	<u>0,26</u> 0,18	<u>0,39</u> 0,16	<u>0,36</u> 0,16	<u>0,36</u> 0,17	<u>0,48</u> 0,15	<u>0,40</u> 0,16	<u>0,46</u> 0,15	<u>0,35</u> 0,17
VII	<u>0,54</u> 0,14	<u>0,51</u> 0,14	<u>0,38</u> 0,17	<u>0,30</u> 0,17	<u>0,32</u> 0,17	<u>0,38</u> 0,16	<u>0,21</u> 0,18	<u>0,21</u> 0,18	<u>0,35</u> 0,17	<u>0,42</u> 0,16	<u>0,46</u> 0,15	<u>0,33</u> 0,17
VIII	<u>0,47</u> 0,15	<u>0,44</u> 0,16	<u>0,39</u> 0,16	<u>0,36</u> 0,17	<u>0,40</u> 0,16	<u>0,48</u> 0,15	<u>0,37</u> 0,17	<u>0,37</u> 0,17	<u>0,45</u> 0,15	<u>0,38</u> 0,16	<u>0,42</u> 0,16	<u>0,29</u> 0,17
IX	<u>0,48</u> 0,15	<u>0,41</u> 0,16	<u>0,31</u> 0,17	<u>0,15</u> 0,19	<u>0,28</u> 0,18	<u>0,40</u> 0,16	<u>0,37</u> 0,18	<u>0,37</u> 0,17	<u>0,51</u> 0,14	<u>0,39</u> 0,16	<u>0,40</u> 0,16	<u>0,29</u> 0,17
X	<u>-0,01</u> 0,19	<u>-0,03</u> 0,19	<u>-0,08</u> 0,19	<u>0,20</u> 0,18	<u>-0,08</u> 0,19	<u>0,09</u> 0,19	<u>-0,13</u> 0,19	<u>-0,13</u> 0,19	<u>-0,13</u> 0,19	<u>-0,09</u> 0,19	<u>-0,04</u> 0,19	<u>-0,17</u> 0,19
XI	<u>0,00</u> 0,19	<u>-0,02</u> 0,19	<u>-0,06</u> 0,19	<u>0,14</u> 0,19	<u>-0,02</u> 0,19	<u>-0,03</u> 0,19	<u>-0,02</u> 0,19	<u>-0,02</u> 0,19	<u>0,08</u> 0,19	<u>0,06</u> 0,19	<u>-0,03</u> 0,19	<u>0,23</u> 0,18
XII	<u>0,02</u> 0,19	<u>0,07</u> 0,19	<u>-0,01</u> 0,19	<u>-0,08</u> 0,19	<u>-0,04</u> 0,19	<u>-0,05</u> 0,19	<u>0,04</u> 0,19	<u>0,04</u> 0,19	<u>0,13</u> 0,19	<u>0,12</u> 0,19	<u>-0,02</u> 0,19	<u>-0,04</u> 0,19

**Примечание:** В табл. 1-3: числитель – коэффициент корреляции, знаменатель – стандартная ошибка; ячейки главной диагонали (одноимённые месяца года) с значимыми коэффициентами корреляции выделены светлым тоном; тёмный тон – значимые коэффициенты корреляции сочетаний месяцев года.

**Note:** In table 1-3, the numerator is the correlation coefficient, the denominator is the standard error; the cells of the main diagonal (months of the year with the same name) with significant correlation coefficients are highlighted in light tones; dark tones are significant correlation coefficients of month-of-the-year combinations.

В целях проследить степень устойчивости колебаний среднемесячных значений оксида углерода во времени на фиксированной частоте был выполнен вейвлет анализ. На рис. 3 приведены амплитудная вейвлет функция и интегральный вейвлет спектр  $\overline{CO}$ . Как следует из рис. 2, в спектре колебаний  $\overline{CO}$  прослеживаются четыре устойчивых максимума на частотах, соответствующих периодам 2,8, 4, 8 и 30 лет, два из которых даёт и спектр Фурье. Полученные выше кросскорреляционные матрицы метеорологических величин и оксида водорода характеризуют статистическую связь оксида углерода с метеорологическими величинами. Для выявления их причинной обусловленности был выполнен причинный анализ [Арушанов, Коротаев, 1994].

Таблица 2

## Кросскорреляционная матрица температуры и оксида углерода

Table 2

## Cross-correlation matrix of relative humidity and carbon monoxide

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
I	<u>-0.02</u> 0,19	<u>-0.06</u> 0,19	<u>0.01</u> 0,19	<u>0.09</u> 0,19	<u>0.11</u> 0,19	<u>0.02</u> 0,19	<u>0.11</u> 0,19	<u>0.06</u> 0,19	<u>0.11</u> 0,19	<u>-0.09</u> 0,19	<u>-0.10</u> 0,19	<u>-0.10</u> 0,19
II	<u>-0.05</u> 0,19	<u>-0.01</u> 0,19	<u>-0.03</u> 0,19	<u>-0.15</u> 0,19	<u>-0.19</u> 0,19	<u>-0.27</u> 0,18	<u>-0.13</u> 0,19	<u>-0.06</u> 0,19	<u>0.01</u> 0,19	<u>-0.06</u> 0,19	<u>-0.14</u> 0,19	<u>-0.11</u> 0,19
III	<u>-0.35</u> 0,18	<u>-0.24</u> 0,18	<u>-0.27</u> 0,18	<u>-0.32</u> 0,17	<u>-0.29</u> 0,18	<u>-0.27</u> 0,18	<u>-0.08</u> 0,19	<u>-0.12</u> 0,19	<u>-0.21</u> 0,18	<u>-0.32</u> 0,17	<u>-0.38</u> 0,16	<u>-0.26</u> 0,18
IV	<u>-0.36</u> 0,17	<u>-0.25</u> 0,18	<u>-0.37</u> 0,17	<u>-0.21</u> 0,18	<u>-0.39</u> 0,16	<u>-0.37</u> 0,37	<u>-0.43</u> 0,16	<u>-0.45</u> 0,15	<u>-0.49</u> 0,15	<u>-0.25</u> 0,18	<u>-0.17</u> 0,19	<u>-0.27</u> 0,18
V	<u>-0.23</u> 0,18	<u>-0.36</u> 0,17	<u>-0.49</u> 0,15	<u>-0.44</u> 0,15	<u>-0.34</u> 0,17	<u>-0.43</u> 0,16	<u>-0.47</u> 0,15	<u>-0.42</u> 0,16	<u>-0.53</u> 0,14	<u>-0.48</u> 0,15	<u>-0.46</u> 0,15	<u>-0.33</u> 0,17
VI	<u>0.23</u> 0,18	<u>-0.22</u> 0,18	<u>-0.30</u> 0,17	<u>-0.21</u> 0,18	<u>-0.21</u> 0,18	<u>-0.21</u> 0,18	<u>-0.39</u> 0,16	<u>-0.43</u> 0,16	<u>-0.53</u> 0,14	<u>-0.47</u> 0,15	<u>-0.49</u> 0,15	<u>-0.29</u> 0,18
VII	<u>-0.14</u> 0,19	<u>-0.08</u> 0,19	<u>-0.08</u> 0,19	<u>-0.07</u> 0,19	<u>-0.01</u> 0,17	<u>-0.01</u> 0,19	<u>0.20</u> 0,18	<u>0.04</u> 0,19	<u>-0.04</u> 0,19	<u>-0.10</u> 0,19	<u>-0.14</u> 0,19	<u>-0.01</u> 0,19
VIII	<u>-0.39</u> 0,16	<u>-0.39</u> 0,16	<u>-0.57</u> 0,13	<u>-0.44</u> 0,16	<u>-0.40</u> 0,16	<u>-0.49</u> 0,15	<u>-0.42</u> 0,16	<u>-0.45</u> 0,15	<u>-0.55</u> 0,13	<u>-0.55</u> 0,13	<u>-0.53</u> 0,14	<u>-0.41</u> 0,16
IX	<u>-0.37</u> 0,17	<u>-0.39</u> 0,16	<u>-0.28</u> 0,18	<u>-0.19</u> 0,19	<u>-0.34</u> 0,17	<u>-0.40</u> 0,16	<u>-0.17</u> 0,19	<u>-0.32</u> 0,17	<u>-0.24</u> 0,18	<u>-0.36</u> 0,17	<u>-0.37</u> 0,17	<u>-0.31</u> 0,17
X	<u>-0.12</u> 0,19	<u>0.08</u> 0,19	<u>0.05</u> 0,19	<u>0.06</u> 0,19	<u>-0.02</u> 0,19	<u>-0.06</u> 0,19	<u>0.06</u> 0,19	<u>0.02</u> 0,19	<u>-0.10</u> 0,19	<u>-0.03</u> 0,19	<u>-0.14</u> 0,19	<u>-0.07</u> 0,19
XI	<u>-0.04</u> 0,19	<u>0.01</u> 0,19	<u>-0.01</u> 0,19	<u>0.02</u> 0,19	<u>-0.01</u> 0,19	<u>0.03</u> 0,19	<u>-0.06</u> 0,19	<u>-0.14</u> 0,19	<u>-0.10</u> 0,19	<u>0.10</u> 0,19	<u>0.12</u> 0,19	<u>-0.21</u> 0,18
XII	<u>-0.09</u> 0,19	<u>-0.11</u> 0,19	<u>-0.10</u> 0,19	<u>-0.21</u> 0,18	<u>-0.11</u> 0,19	<u>-0.08</u> 0,19	<u>0.17</u> 0,19	<u>0.07</u> 0,19	<u>0.09</u> 0,19	<u>-0.02</u> 0,19	<u>0.03</u> 0,19	<u>0.03</u> 0,19

Таблица 3

## Кросскорреляционная матрица скорости ветра и оксида углерода

Table 3

## Cross-correlation matrix of wind speed and carbon monoxide

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
I	<u>0.06</u> 0,19	<u>0.02</u> 0,19	<u>0.20</u> 0,19	<u>0.10</u> 0,19	<u>0.12</u> 0,19	<u>-0.01</u> 0,19	<u>0.06</u> 0,19	<u>-0.07</u> 0,19	<u>0.00</u> 0,19	<u>-0.03</u> 0,19	<u>-0.05</u> 0,19	<u>-0.03</u> 0,19
II	<u>0.44</u> 0,15	<u>0.42</u> 0,16	<u>0.50</u> 0,14	<u>0.23</u> 0,18	<u>0.27</u> 0,18	<u>0.37</u> 0,17	<u>0.49</u> 0,15	<u>0.50</u> 0,14	<u>0.52</u> 0,14	<u>0.48</u> 0,15	<u>0.43</u> 0,16	<u>0.40</u> 0,16
III	<u>0.17</u> 0,19	<u>0.12</u> 0,19	<u>0.18</u> 0,19	<u>0.15</u> 0,19	<u>0.20</u> 0,18	<u>0.32</u> 0,17	<u>0.32</u> 0,17	<u>0.32</u> 0,17	<u>0.22</u> 0,18	<u>0.08</u> 0,19	<u>0.15</u> 0,19	<u>0.05</u> 0,19
IV	<u>0.36</u> 0,17	<u>0.25</u> 0,18	<u>0.27</u> 0,18	<u>0.10</u> 0,19	<u>0.17</u> 0,19	<u>0.25</u> 0,18	<u>0.18</u> 0,19	<u>0.16</u> 0,19	<u>0.29</u> 0,18	<u>0.27</u> 0,18	<u>0.31</u> 0,17	<u>0.41</u> 0,16
V	<u>0.26</u> 0,17	<u>0.32</u> 0,17	<u>0.22</u> 0,18	<u>0.05</u> 0,19	<u>0.07</u> 0,19	<u>0.08</u> 0,19	<u>0.26</u> 0,18	<u>0.31</u> 0,17	<u>0.35</u> 0,17	<u>0.36</u> 0,17	<u>0.37</u> 0,17	<u>0.32</u> 0,17
VI	<u>0.48</u> 0,15	<u>0.38</u> 0,16	<u>0.32</u> 0,17	<u>0.18</u> 0,19	<u>0.28</u> 0,18	<u>0.31</u> 0,17	<u>0.32</u> 0,17	<u>0.36</u> 0,17	<u>0.32</u> 0,17	<u>0.28</u> 0,18	<u>0.23</u> 0,18	<u>0.16</u> 0,19
VII	<u>0.30</u> 0,17	<u>0.12</u> 0,19	<u>0.25</u> 0,18	<u>0.13</u> 0,19	<u>0.12</u> 0,19	<u>0.13</u> 0,19	<u>0.09</u> 0,19	<u>0.17</u> 0,19	<u>0.19</u> 0,19	<u>0.07</u> 0,19	<u>0.10</u> 0,19	<u>0.26</u> 0,18
VIII	<u>-0.02</u> 0,19	<u>0.13</u> 0,19	<u>0.21</u> 0,18	<u>0.11</u> 0,19	<u>0.13</u> 0,19	<u>0.27</u> 0,18	<u>0.21</u> 0,18	<u>0.22</u> 0,18	<u>0.16</u> 0,19	<u>0.22</u> 0,18	<u>0.17</u> 0,19	<u>0.39</u> 0,16
IX	<u>-0.28</u> 0,18	<u>-0.20</u> 0,19	<u>-0.24</u> 0,18	<u>-0.37</u> 0,17	<u>-0.36</u> 0,17	<u>-0.36</u> 0,17	<u>-0.45</u> 0,15	<u>-0.32</u> 0,17	<u>-0.36</u> 0,17	<u>-0.13</u> 0,19	<u>-0.17</u> 0,19	<u>-0.13</u> 0,19
X	<u>-0.24</u> 0,18	<u>-0.24</u> 0,18	<u>-0.01</u> 0,19	<u>0.03</u> 0,19	<u>-0.10</u> 0,19	<u>-0.08</u> 0,19	<u>-0.18</u> 0,19	<u>-0.15</u> 0,19	<u>-0.17</u> 0,19	<u>0.06</u> 0,19	<u>0.15</u> 0,19	<u>-0.02</u> 0,19
XI	<u>-0.14</u> 0,19	<u>-0.18</u> 0,19	<u>-0.20</u> 0,18	<u>-0.32</u> 0,17	<u>-0.34</u> 0,17	<u>-0.25</u> 0,18	<u>-0.21</u> 0,18	<u>-0.28</u> 0,18	<u>-0.14</u> 0,19	<u>-0.22</u> 0,18	<u>-0.28</u> 0,18	<u>-0.32</u> 0,17
XII	<u>-0.08</u> 0,19	<u>-0.27</u> 0,18	<u>-0.13</u> 0,19	<u>-0.16</u> 0,17	<u>-0.15</u> 0,19	<u>-0.06</u> 0,19	<u>-0.11</u> 0,19	<u>-0.09</u> 0,19	<u>-0.15</u> 0,19	<u>-0.13</u> 0,19	<u>-0.11</u> 0,19	<u>-0.29</u> 0,18

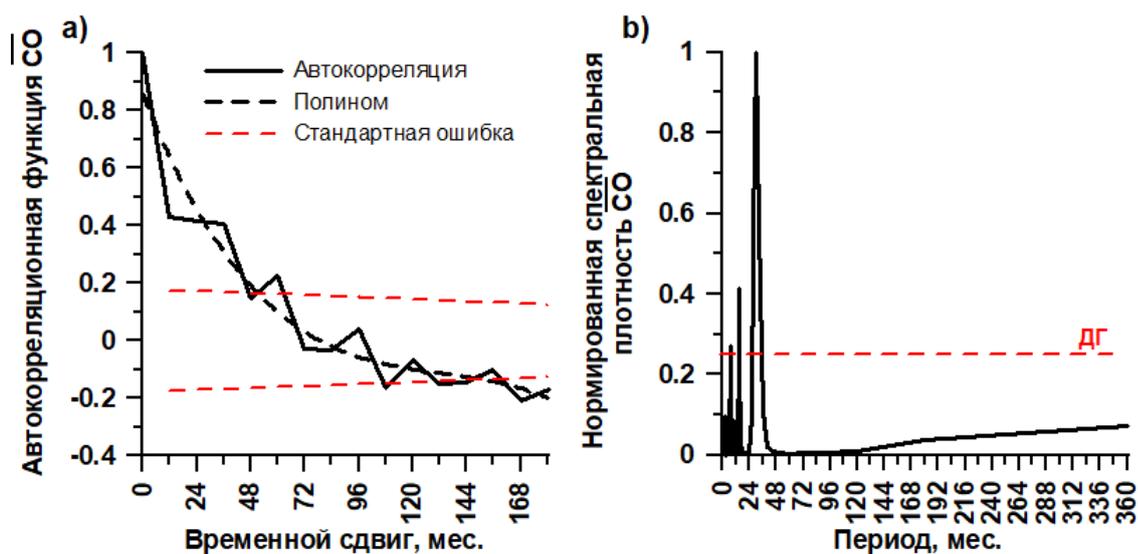


Рис. 2. Автокорреляционная функция (а) и нормированная спектральная плотность (б) среднемесячных значений оксида углерода  $\overline{CO}$ . ДГ – доверительная граница.

Fig. 2 Autocorrelation function (a) and normalized spectral density (b) of monthly average values of carbon monoxide  $\overline{CO}$ . ДГ – confidence limit.

Результаты расчёта функции причинности для  $X(t)$   $\overline{CO}$  ( $X(t)$  – метеорологические ряды относительной влажности, температуры и скорости ветра) приведены на рис. 4. Для всех  $X(t)$  при нулевом временном сдвиге  $\gamma < 1$ : изменение концентрации  $\overline{CO}$  обусловлено метеорологическими факторами.

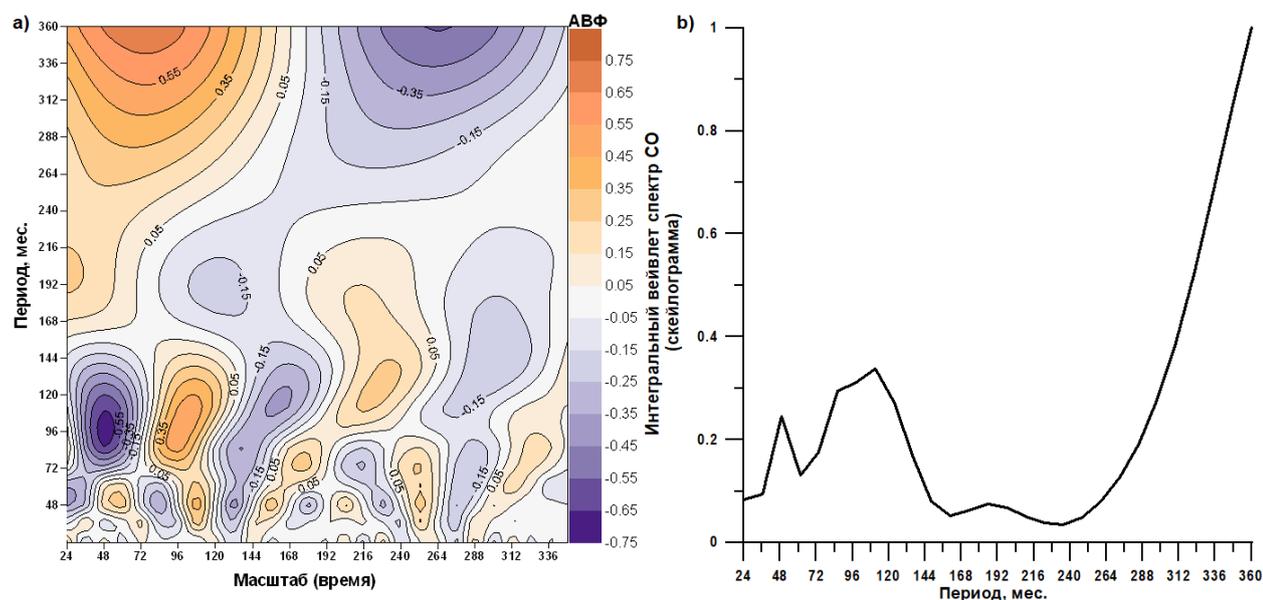


Рис. 3. Амплитудная вейвлет функция (а) и интегральный вейвлет спектр (скейлограмма)  $\overline{CO}$

Fig. 3. Amplitude wavelet function (a) and integral wavelet spectrum (scalogram)  $\overline{CO}$

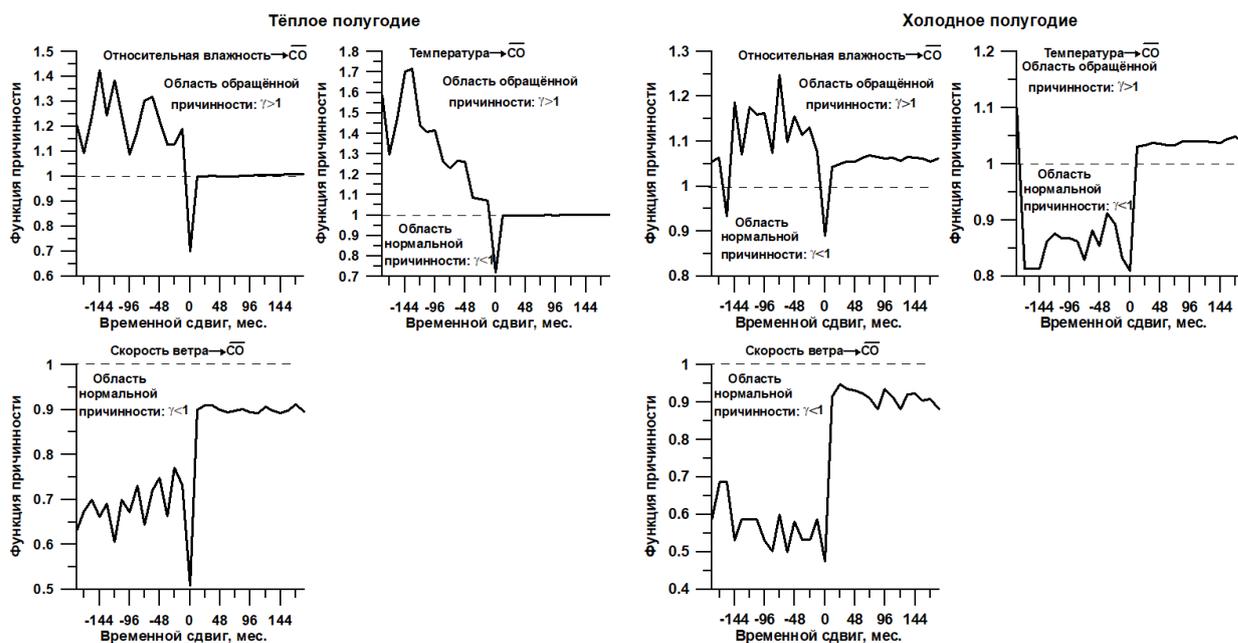


Рис. 4. Функция причинности между метеорологическими величинами и оксидом углерода в тёплое и холодное полугодия

Fig. 4. Causality function between meteorological variables and carbon monoxide in the warm and cold half-years

Если обратиться к подробному анализу представленных на рис. 4 функций причинности, как функций временного сдвига, то выше сделанный, по сути, тривиальный вывод оказывается более глубоким. Действительно, по минимальному значению функции причинности можно сделать вывод какие из рассматриваемых метеорологических величин воздействуют на концентрацию оксида углерода в большей степени, а какие в меньшей. Оказывается, и в тёплое, и в холодное полугодия первостепенную роль в концентрации  $\overline{CO}$  играет скорость ветра, затем влажность и на последнем месте температура. Функция причинности для  $V \rightarrow \overline{CO}$  ( $V$  – скорость ветра) во всём диапазоне временных сдвигов остаётся в области нормальной причинности. Эта указывает на непрерывное воздействие скорости ветра на концентрацию  $\overline{CO}$ , что нельзя сказать о других метеорологических величинах.

Что касается поведения функции причинности при временных сдвигах – в одних случаях она остаётся в области нормальной причинности ( $\gamma < 1$ ) или её отсутствии ( $\gamma = 1$ ), в других – переходит в область обращённой причинности ( $\gamma > 1$ ), то рассмотрение этого физического феномена выходит за рамки настоящей статьи и относится к эффектам диссипативных нелокальных процессов [Коротаев, Морозов, 2018].

**Заключение.** Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. Установлено влияние метеорологических факторов на концентрацию оксида углерода, которое неоднозначно в зависимости от метеорологической величины и месяца года: значимые коэффициенты линейной кросскорреляции относительной влажности, температуры с одной стороны и среднемесячных концентраций оксида углерода прослеживаются с марта месяца по декабрь. Значимый коэффициент линейной кросскорреляции для скорости ветра и среднемесячных концентраций оксида углерода имеет место только в феврале, июне, августе, сентябре-декабре.

В спектре колебаний  $\overline{CO}$  присутствуют шесть значимых составляющих с периодом 0,5, 1, 2,8, 4, 8 и 30 лет. Наиболее устойчивые на фиксированной частоте составляющие прослеживаются на периодах 2,8, 4, 8 и 30 лет.

Результаты причинного анализа показали причинную обусловленность концентрации оксида углерода метеорологическими факторами, из которых наиболее сильное воздействие оказывает скорость ветра, которое не проявилось в линейном коэффициенте кросскорреляции, что указывает на значительную нелинейность данного воздействия.

**Вклад авторов. М.Л. Арушанов:** численные расчёты, методы анализа, редакция статьи. **М. Алаутдинов:** постановка задачи, формирование базы данных используемого в работе материала, анализ результатов. Все авторы прочитали и согласны с подготовленной к публикации версией рукописи.

## ЛИТЕРАТУРА

*Алаутдинов М.* Загрязнение атмосферного воздуха оксидом углерода и его распространение по территории города Ташкент за избранный период // Водные ресурсы аридных регионов в условиях изменения климата: проблемы и их решения, 2023. – С. 59-62.

*Арушанов М.Л.* Практические вопросы использования вейвлет-преобразования в метеорологии. – Ташкент: НИГМИ, 2015. – 50 с.

*Арушанов М.Л., Кортаев С.М.* Причинный анализ и его применение для изучения физических процессов в атмосфере // Метеорология и гидрология, 1994. – № 6. – С. 15-22.

*Боков В.Н., Воробьев В.Н., Сарвинова Е.В.* Влияние изменчивости ветра на внутригодовое распределение атмосферных примесей в Санкт-Петербурге // Ученые записки РГГМУ, 2006. – №3. – С. 95-103.

*Дженкинс Г., Ваттс Д.* Спектральный анализ и его приложения – М.: Мир, 1972. – Том 2. – 287 с.

*Зобнина Ю.В.* Отравление монооксидом углерода (угарным газом) – СПб.: Тактик-Студио, 2011. – С. 8-86.

*Созонтова А.Н., Пепина Л.А.* Загрязнение атмосферного воздуха автомобильно-дорожным комплексом // Alfabuild, 2017. – №1 (1). – С. 99-110.

*Инагамова С.И., Мухтаров Т.М.* Особенности синоптических процессов Средней Азии. – Ташкент: САНИГМИ, 2002. – 485 с.

*Кортаев С.М., Морозов А.Н.* Нелокальность диссипативных процессов – причинность и время. – М.: Физматлит, 2018. – 212 с.

*Людчик А.М., Мельник Е.А., Павленко П.Н.* Антропогенное загрязнение воздуха оксидом углерода и оксидами азота в городах Беларуси. – Минск: ИВЦ Минфина, 2022. – С. 155-158.

*Хайруллина Г.Р., Астафьева Н.М.* Квазидвухлетние колебания в атмосфере Земли. Обзор: наблюдение и механизмы формирования. – М.: ИКИ, 2011. – 60 с.

*Arushanov M.L., Alautdinov M.* Determination of variations in sulfur dioxide by variations in solar activity / Наука и инновации. Материалы международного научного форума: Москва, 26 сентября 2024. – С. 212-218.

*Электронный ресурс:*

Загрязнение атмосферного воздуха и здоровье человека. URL: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

## ТОШКЕНТ ШАҲРИДА УГЛЕРОД ОКСИДИ КОНЦЕНТРАЦИЯСИНИНГ МЕТЕОРОЛОГИК КАТТАЛИКЛАР ВА ҚУЁШ ФАОЛЛИГИ ЎЗГАРИШЛАРИГА БОҒЛИҚЛИГИ

М.Л. АРУШАНОВ<sup>1</sup>, М. АЛАУТДИНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Гидрометеорология илмий-тадқиқот институти, mikl-arushanov@rambler.ru

<sup>2</sup> Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий Университети

**Аннотация.** Мақолада углерод оксидининг (СО) вақт бўйича ўзгарувчанлиги статистик тузилиши кўриб чиқилган. Тошкент шаҳрида унинг концентрацияси ўзгарувчанлигига метеорологик катталиклар (ҳаво ҳарорати, нисбий намлик, босим, шамол тезлиги) ва Қуёш фаоллиги ўзгарувчанлигининг (Вольф сонлари) боғлиқлиги йил ойлари функцияси сифатида тадқиқ қилинган. Метеорологик катталиклар ва СО орасида аҳамиятли корреляцияли ойлари аниқланган.

Углерод оксиди концентрацияларининг 30 йиллик (1991-2020 йй.) давр учун тебраниш спектрлари ҳисобланган. Спектрнинг 0,5, 1, 2,8, 4, 8 ва 30 йиллик тебраниш даврли бош ташкил этувчилари аниқланган. Углерод оксиди концентрацияси ва кўриляётган метеорологик катталиклар ҳамда Вольф сонлари орасида сабаб боғлиқлиги тадқиқ қилинган. Тошкент шаҳрида метеорологик катталиклар ва СО концентрацияси ўзгаришлари орасида сабаб боғлиқлигининг мавжудлиги, Қуёш фаоллиги билан эса боғлиқлиқнинг йўқлиги аниқланган.

**Калит сўзлар:** углерод оксиди, метеорологик катталиклар, кросскорреляция, тебраниш спектри, сабаб функцияси, вейвлет функция.

## DEPENDENCE OF CARBON MONOXIDE CONCENTRATION ON METEOROLOGICAL VALUES AND VARIATIONS OF SOLAR ACTIVITY IN TASHKENT

M.L. ARUSHANOV<sup>1</sup>, M. ALAUTDINOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hydrometeorological Research Institute, mikl-arushanov@rambler.ru

<sup>2</sup> National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek

**Abstract.** The paper considers the temporal statistical structure of carbon monoxide (CO) and studies the dependence of the influence of meteorological variables (temperature, relative humidity, pressure, wind speed) and variations in solar activity (Wolf numbers) on the variability of its concentration in Tashkent as a function of the month of the year. The months of the year with a significant correlation between CO and meteorological values were identified.

The spectrum of variations in carbon monoxide concentrations was calculated for a 30-year sample (1991-1920). The main components of the spectrum with an oscillation period of 0.5, 1, 2.8, 4, 8 and 30 years were obtained. The causal relationship between CO and the meteorological values and Wolf numbers under consideration was investigated. The causal dependence of variations in CO concentration in Tashkent on meteorological factors and the absence of such dependence on variations in solar activity were obtained.

**Keywords:** carbon monoxide, meteorological values, cross-correlation, oscillation spectrum, causality function, wavelet function.

## REFERENCE

*Alautdinov M.* Zagryaznenie atmosfernogo vozduha oksidom ugleroda i ego rasprostranenie po territorii goroda Tashkenta za izbrannyi [Pollution of atmospheric air with carbon monoxide and its spread over the territory of Tashkent city for the selected period] // *Vodnye resursy aridnyh regionov v usloviyah izmeneniya klimata: problem i ih resheniya.* – 2023. – PP. 59-62. (in Russian)

*Arushanov M.L.* *Practicheskie voprosy ispolzovaniya veivlet-preobrazovaniya v meteorologii* [Practical issues of using wavelet transform in meteorology]. – Tashkent: NIGMI, 2015. – 50 p. (in Russian)

*Arushanov M.L., Korotaev S.M.* Prichinni analiz i ego primeneniye dlya izucheniya fizicheskikh processov v atmosfere [Causal analysis and its application to the study of physical processes in the atmosphere] // *Meteorologiya i Hydrologiya*, 1994. – №6. – PP. 15-22. (in Russian)

*Bokov V.N., Vorobyov V.N., Sarvirova E.V.* Vliyanie izmenchivosti vetra na vnutrigodovoe raspredelenie atmosferykh primesei v Sankt-Peterburge [Influence of wind variability on the intra-annual distribution of atmospheric impurities in St. Petersburg] // *Uchenie zapiski RGGMU*, 2006. – № 3. – PP. 95-103. (in Russian)

*Jenkins G., Watts D.* *Spektralnyi analiz i ego prilozheniya* [Spectral Analysis and Its Applications]. – M.: Mir, 1972. – 287 p. (in Russian)

*Zobnina Yu.V.* Otravlenie monooksidom ugleroda (ugarnim gazom) [Carbon monoxide poisoning (carbon monoxide)]. – SPb.: Tactic-Studio, 2011. – PP. 8.-86. (in Russian)

*Sozontova A.N., Pepina L.A.* Zasgryaznenie atmosfernogo vozduha avtomobilno-dorojnym kompleksom [Pollution of atmospheric air by the automobile and road complex] // *Alfabuild*, 2017. – №1 (1). – PP. 99-110. (in Russian)

*Inagamova S.I., Mukhtarov T.M.* Osobennosti sinopticheskikh processov Srednei Azii [Features of synoptic processes in Central Asia]. – Tashkent: SANIGMI, 2002. – 485 p. (in Russian)

*Korotaev S. M., Morozov A. N.* Nelokalnost dissipativnykh processov – prichinnost i vremya [Nonlocality of dissipative processes – causality and time]. – M.: Fizmatlit, 2018. – 212 p. (in Russian)

*Lyudchik A.M., Melnik E.A., Pavlenko P.N.* Antropogennoe zagryaznenie vozduha oksidom ugleroda i oksidami azota v gorodakh Belarusi [Anthropogenic air pollution with carbon monoxide and nitrogen oxides in the cities of Belarus]. – Minsk: IVC Minfina, 2022. – PP. 155-158. (in Russian)

*Hairullina G.R., Astafieva N.M.* Kvazidvuhletnie kolebaniya v anvsfere Zemli [Quasi-biennial oscillations in the Earth's atmosphere]. – M.: IKI, 2011. – 60 p. (in Russian)

*Arushanov M.L., Alautdinov M.* Determination of variations in sulfur dioxide by variations in solar activity / *Nauka i innovatsii. Materiali mejdunarodnogo nauchnogo foruma: Moskva, 26 sentyabrya, 2024.* – PP. 212-218.

*Electronic resource:*

Zagryazneniye atmosfernogo vozduxa i zdorove cheloveka. URL: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)