



Научная статья

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА КАЧЕСТВО ВОЗДУХА В ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ГОРОДАХ КАЗАХСТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АТМОСФЕРНОГО АНАЛИЗА И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Жанат А. Байгазинов<sup>1</sup> PhD , Саян Е. Сальменбаев<sup>2\*</sup> , Нурлан Ж. Мухамедияров<sup>1,3</sup> ,  
Касым Ш. Жумадилов<sup>4</sup> PhD , Медет Р. Актаев<sup>1</sup> , Лаура Б. Кенжина<sup>2</sup> PhD , Елена Н. Поливкина<sup>2</sup> PhD ,  
Ажар Ж. Ташекова<sup>2</sup> PhD , Алмагуль А. Мухамедиярова<sup>5</sup>, Валерий Н. Монаенко<sup>2</sup>, Назира Н. Берікбол<sup>6</sup> 

<sup>1</sup> АО «Парк ядерных технологий», Курчатов, Казахстан; baygazinov@pnt.kz (ЖАБ), mukhamediyarov@pnt.kz (НЖМ), medet\_aktaev@mail.ru (МРА)

<sup>2</sup> Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, г. Курчатов, Казахстан; salmenbayev@gmail.com (СЕС), laurakenzhina@nnc.kz (ЛБК), polivkina@nnc.kz (ЕНП), esenzholova@nnc.kz (АЖТ), monaenko@nnc.kz (ВНМ)

<sup>3</sup> ТОО «Научно-исследовательский центр «EventumLab», г. Семей, Казахстан; mukhamediyarov@pnt.kz (НЖМ)

<sup>4</sup> НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», г. Астана, Казахстан; zhumadilovk@gmail.com (КШЖ)

<sup>5</sup> ТОО «СемАз», г. Семей, Казахстан; mukhamediyarova88@mail.ru (ААМ)

<sup>6</sup> НАО «Университет имени Шакарима», г. Семей, Казахстан; nazira\_berikbolova@mail.ru (ННБ)

Автор корреспонденции: Саян Е. Сальменбаев, salmenbayev@gmail.com

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

качество воздуха, загрязняющие вещества, метеорологические параметры, корреляционный анализ, обратные траектории, переноса воздушных масс

### АБСТРАКТ

В статье проведен ретроспективный анализ зависимостей между метеорологическими параметрами окружающей среды и уровнями загрязнения городов Усть-Каменогорск и Павлодар в 2024 году. Анализ корреляционных зависимостей позволил выявить значимые, средние и слабые связи между климатическими факторами и загрязняющими веществами. Так, например, температура воздуха оказывала решающее влияние на концентрации SO<sub>2</sub> и CO в Усть-Каменогорске, а в Павлодаре – на содержание NO и O<sub>3</sub>. Влажность и скорость ветра определяли механизмы рассеивания и накопления загрязнителей в г. Усть-Каменогорск. Отдельное внимание было уделено межкомпонентным корреляциям, отражающим фотохимические процессы и источники загрязнения. Анализ обратных траекторий показал, что воздух поступает с разных направлений, а загрязняющие вещества могут переноситься на большие расстояния.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Качество атмосферного воздуха напрямую влияет на здоровье населения и устойчивое развитие городов. В результате автомобильных, промышленных и энергетических выбросов в атмосферу попадает большое количество различных вредных веществ [1...2], что приводит к негативным последствиям, включая увеличение заболеваемости населения и ухудшение экологической ситуации в целом [3]. Ключевую роль в динамике концентраций загрязняющих веществ играют метеорологические параметры: температура, влажность, атмосферное давление и скорость ветра. Понимание этих зависимостей необходимо для прогнозирования эпизодов высокого загрязнения и разработки эффективных профилактических мер по снижению выбросов вредных веществ в атмосферу.

Целью настоящего исследования является выявление и количественная оценка взаимосвязи между метеорологическими параметрами и концентрациями загрязняющих

#### По статье:

Получено: 03.07.2025

Пересмотрено: 13.08.2025

Принято: 22.09.2025

Опубликовано: 01.10.2025

**Для цитирования:**

Байгазинов Ж., Сальменбаев С., Мухамедияров Н., Жумадилов К., Актаев М., Кенжина Л., Поливкина Е., Ташекова А., Мухамедиярова А., Монаенко В., Берікбол Н. Исследование влияния метеорологических параметров на качество воздуха в промышленных городах Казахстана с использованием современных систем атмосферного анализа и моделирования // Гидрометеорология и экология, 118 (3), 2025, 48-65.

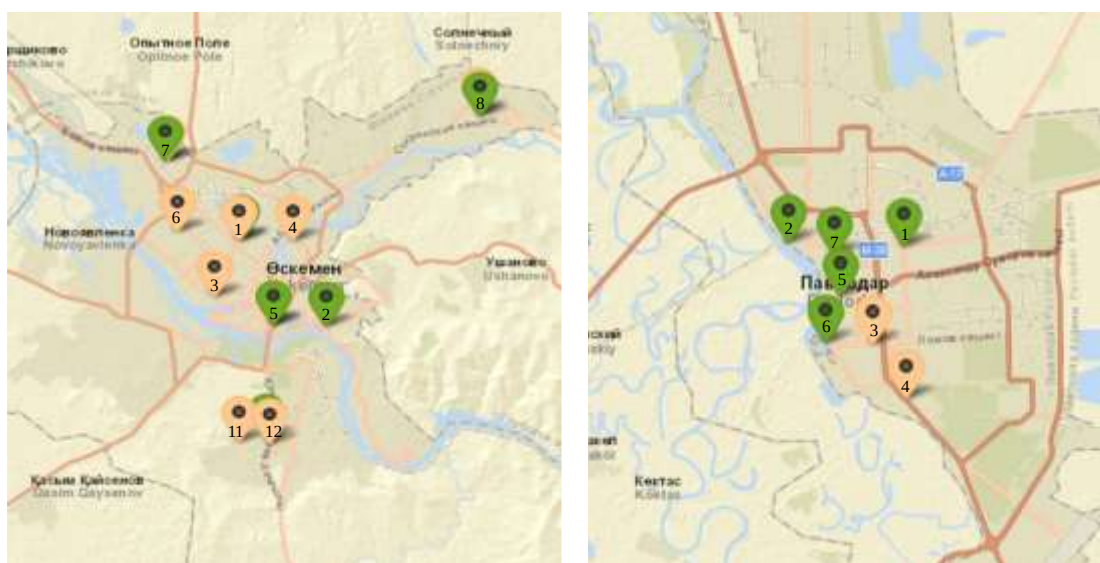
веществ в атмосфере двух индустриально развитых городов Казахстана с использованием современных программных средств анализа.

**2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

В работе были использованы материалы опубликованные РГП «Казгидромет» в бюллетенях состояния воздушного бассейна, а также бюллетенях о состоянии окружающей среды Восточно-Казахстанской и Абайской, а также Павлодарской областей за 2024 год [4...5].

Наблюдение за состоянием атмосферного воздуха в г. Усть-Каменогорск проводится на 10 постах наблюдения (рисунок 1), 5 из которых являются только автоматическими (№2, №3, №4, №6, №11), на оставшихся 5, помимо автоматических измерений, также производится ручной отбор проб.

Наблюдение за состоянием атмосферного воздуха на территории г. Павлодар проводится на 7 постах мониторинга (рисунок 1), 5 из которых являются автоматическими (с 3 по 7 станцию).



г. Усть-Каменогорск

г. Павлодар

**Рисунок 1.** Схема расположения постов наблюдения [6]

Суммарное количество показателей, определяемых по г. Усть-Каменогорск, составило 21, при этом перечень загрязнителей, определяемых на автоматических станциях, большей частью ограничен диоксидом серы, оксидом углерода, диоксидом азота и сероводородом. Взвешенные частицы (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>) и озон определяются только на двух автоматических станциях (№2 и №3). На ручных постах проводятся измерения гамма-фона и проводится отбор проб на определение содержания оксида азота, фенола, фтористого- и хлористого водорода, формальдегида, серной кислоты, хлора, бериллия, кадмия, меди, свинца, цинка и бензапирена.

Число показателей, определяемых по г. Павлодар, составило 12. При этом основными определяемыми загрязнителями являются диоксид азота, диоксид серы, оксид углерода, сероводород, озон. На трех автоматических станциях (№5, №6 и №7) также определяется аммиак. Ручной отбор проб производится на станциях №1 и №2, определяемыми параметрами являются взвешенные частицы (пыль), оксид азота, диоксид серы, оксид углерода, сероводород, фенол хлор, хлористый водород.

Анализ данных проводился в среде RStudio (2025.05.0+496, R4.5.1). Для анализа и визуализации данных атмосферного воздуха применялся специализированный пакет OpenAir, предназначенный для обработки данных мониторинга загрязняющих веществ [7]. Чтобы минимизировать вероятность случайных зависимостей в анализ включались

только переменные имеющие высокую достоверность связи ( $p \leq 0,05$ ). Давление воздуха было исключено из моделей из-за высокой мультиколлинеарности с температурой ( $r \leq -0,91$ ).

Для построения обратных траекторий движения воздушных масс использовались архивные метеорологические данные лаборатории воздушных ресурсов (NOAA, США) (Архивные метеоданные GDAS1) и специализированный пакет SplitR [7]. Метод траекторного моделирования достаточно широко используется в научной среде с целью выявления возможных источников загрязнения атмосферного воздуха или путей распространения аллергенов [9...10].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### *Корреляционный анализ по г. Усть-Каменогорск*

В таблице 1 представлены данные по анализу корреляционных связей между концентрациями атмосферных загрязняющих веществ и ключевыми метеорологическими параметрами (температура, давление, влажность, скорость ветра) в г. Усть-Каменогорск.

**Таблица 1**

*Корреляционные зависимости между метеопараметрами и содержанием загрязнителей в воздухе*

*г. Усть-Каменогорск*

| Исследуемый метеопараметр | pm25  | pm10 | SO <sub>2</sub> | CO           | NO <sub>2</sub> | NO    | O <sub>3</sub> | H <sub>2</sub> S | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O | HF    | Cl <sub>2</sub> | HCl          | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | C <sub>20</sub> H <sub>12</sub> | Pb           | Cd           | Zn         | Cu    | Be          |
|---------------------------|-------|------|-----------------|--------------|-----------------|-------|----------------|------------------|---------------------------------|-------|-----------------|--------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------|--------------|------------|-------|-------------|
| Температура               | -0.22 | -0.4 | <b>0.9</b>      | <b>-0.89</b> | 0.37            | 0.31  | 0.48           | 0.11             | 0.14                            | -0.31 | -0.3            | <b>-0.58</b> | -0.42                          | 0.39                            | 0.32         | 0.5          | -0.39      | -0.51 | -0.56       |
| Давление воздуха          | 0.1   | 0.28 | <b>-0.81</b>    | <b>0.86</b>  | -0.44           | -0.41 | -0.54          | -0.36            | -0.04                           | 0.5   | 0.27            | <b>0.67</b>  | 0.52                           | -0.27                           | -0.21        | -0.46        | 0.33       | 0.44  | <b>0.62</b> |
| Влажность                 | -0.25 | 0.11 | -0.33           | <b>0.69</b>  | <b>-0.59</b>    | -0.56 | -0.46          | 0.1              | -0.53                           | 0.25  | -0.04           | 0.35         | <b>0.64</b>                    | -0.05                           | 0.28         | <b>-0.81</b> | <b>0.8</b> | 0.48  | <b>0.8</b>  |
| Скорость ветра            | 0.48  | 0.53 | <b>-0.8</b>     | <b>0.69</b>  | -0.03           | -0.19 | -0.15          | 0.06             | -0.07                           | 0.17  | <b>0.67</b>     | 0.47         | 0.29                           | -0.46                           | <b>-0.64</b> | -0.43        | 0.25       | 0.56  | 0.31        |

\* коэффициенты корреляции при уровне значимости 0.05 выделены жирным шрифтом, при уровне значимости 0,01 – дополнительно выделены подчеркиванием.

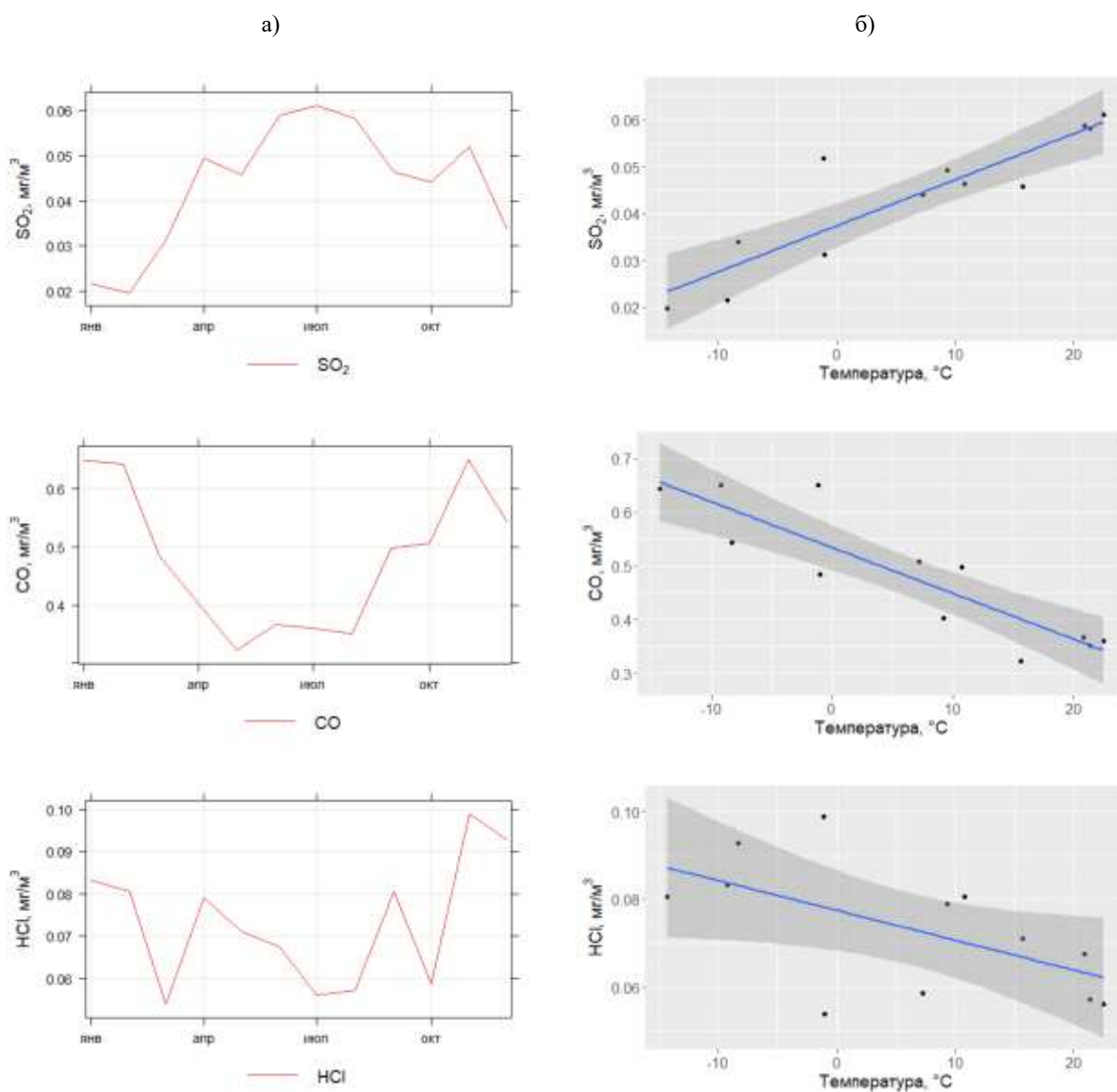
Анализ полученных корреляционных зависимостей позволил обнаружить прямые и обратные корреляции между содержанием загрязняющих веществ в атмосфере исследуемых городов и погодными условиями.

#### *Влияние температуры*

Температурные изменения оказывают значительное влияние на динамику атмосферных загрязнителей, особенно SO<sub>2</sub> и CO. Анализ данных показал сильную положительную корреляцию между температурой и SO<sub>2</sub> ( $r = 0.9$ ) и выраженную отрицательную связь с CO ( $r = -0.89$ ). Умеренная отрицательная корреляция наблюдается для хлористого водорода ( $r = -0.58$ ).

На рисунке 2 показаны сезонные колебания концентраций SO<sub>2</sub>, CO и хлористого водорода (HCl), а также графики зависимости их концентраций от температуры воздуха.

Из рисунка 2 видно, что концентрация SO<sub>2</sub> имеет выраженные сезонные изменения. Самый высокий уровень концентрации наблюдается в июле, а затем идет снижение к октябрю. Это может быть связано с увеличением промышленной активности или неблагоприятными метеорологическими условиями (штиль, туман, инверсия температуры), которые способствовали накоплению загрязняющих веществ. Рост концентрации SO<sub>2</sub> с повышением температуры подтверждается трендом регрессионной линии (рисунок 2).



**Рисунок 2.** Графики а) сезонных изменений концентрации SO<sub>2</sub>, CO, HCl и б) зависимости концентрации SO<sub>2</sub>, CO, HCl от температуры

Уровень угарного газа (CO) заметно изменяется в течение года. Его максимальная концентрация наблюдается зимой, после чего содержание CO снижается весной и летом, а осенью вновь возрастает (рисунок 2). Это подтверждается отрицательной корреляцией между температурой окружающей среды и уровнем CO (рисунок 2). Возможными причинами таких сезонных колебаний являются интенсивное использование отопительных систем в холодное время года, зачастую с низкой эффективностью. Дополнительно к этому зимой, в целом, наблюдается увеличение времени работы двигателей внутреннего сгорания автотранспорта, что также способствует росту выбросов CO.

Что касается HCl то ее колебания не имеют четкой сезонной структуры, хотя в целом, летом наблюдается некоторый минимум (рисунок 2). Зависимость от температуры менее выражена – при повышении температуры концентрация HCl немного снижается (рисунок 2). Как известно выделение хлора (Cl<sub>2</sub>) и HCl может происходить в процессе технологических процессов, сопровождающихся обжигом глинистых минералов, плавке медных, никелевых, кобальтовых и других руд [12]. Так как одним из значимых источников поступления Cl<sub>2</sub> и HCl в воздух населенных пунктов является сжигание

каменного угля и хлорсодержащих полимеров [12...13], то вполне вероятно, что в холодное время года усиливается загрязнение атмосферы бытовым дымом и дымом от котельных. При этом, конечно же, не стоит забывать и про аварийные выбросы хлора, как, например, в случае произошедшем 19.05.2025 г. на «Усть-Каменогорском титаномагнелиевом комбинате» [14].

#### *Влияние влажности*

На рисунке 3 показаны сезонные колебания концентраций CO, NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Cd, Zn и Be, а также графики зависимости их концентраций от влажности воздуха.

Как можно увидеть из полученных графиков прослеживается сильная положительная корреляция между влажностью воздуха и концентрациями Be и Zn и умеренно положительная корреляция для CO и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Отрицательные корреляции наблюдаются для NO<sub>2</sub> и Cd.

#### *Влияние скорости ветра*

На рисунке 4 приведены корреляционные зависимости между концентрациями SO<sub>2</sub>, CO, Cl<sub>2</sub>, Pb и силой ветра. Как видно из графиков, при увеличении силы ветра концентрации SO<sub>2</sub> и Pb уменьшаются, что очевидно связано с их рассеиванием. Концентрации же CO и Cl<sub>2</sub> напротив увеличиваются, что видимо связано с источником их поступления – дымом от сжигания ископаемого топлива и хлорсодержащих полимеров, который ветер сносит от частного сектора и городских котельных до метеостанций.

#### *Взаимосвязь между загрязняющими веществами*

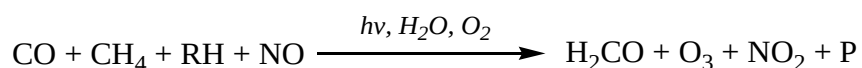
Понимание того, как различные переменные связаны друг с другом, может вызывать некоторые затруднения, когда количество этих переменных относительно велико. Одним из полезных методов является построение корреляционной матрицы, которая обеспечивает визуальное представление отношений между переменными. Могут использоваться различные варианты визуализации [15]. В данном случае корреляции кодируются по форме, цвету, числовому значению. Положительные корреляции наклонены в правую сторону, отрицательные – в левую. При идеальной корреляции проводится линия под углом 45 градусов, при нулевой корреляции – форма описана кругом. Насыщенность цвета указывает на силу связи, чем он насыщеннее, тем сильнее связь.

На рисунке 5 представлена матрица загрязняющих веществ по г. Усть-Каменогорск.

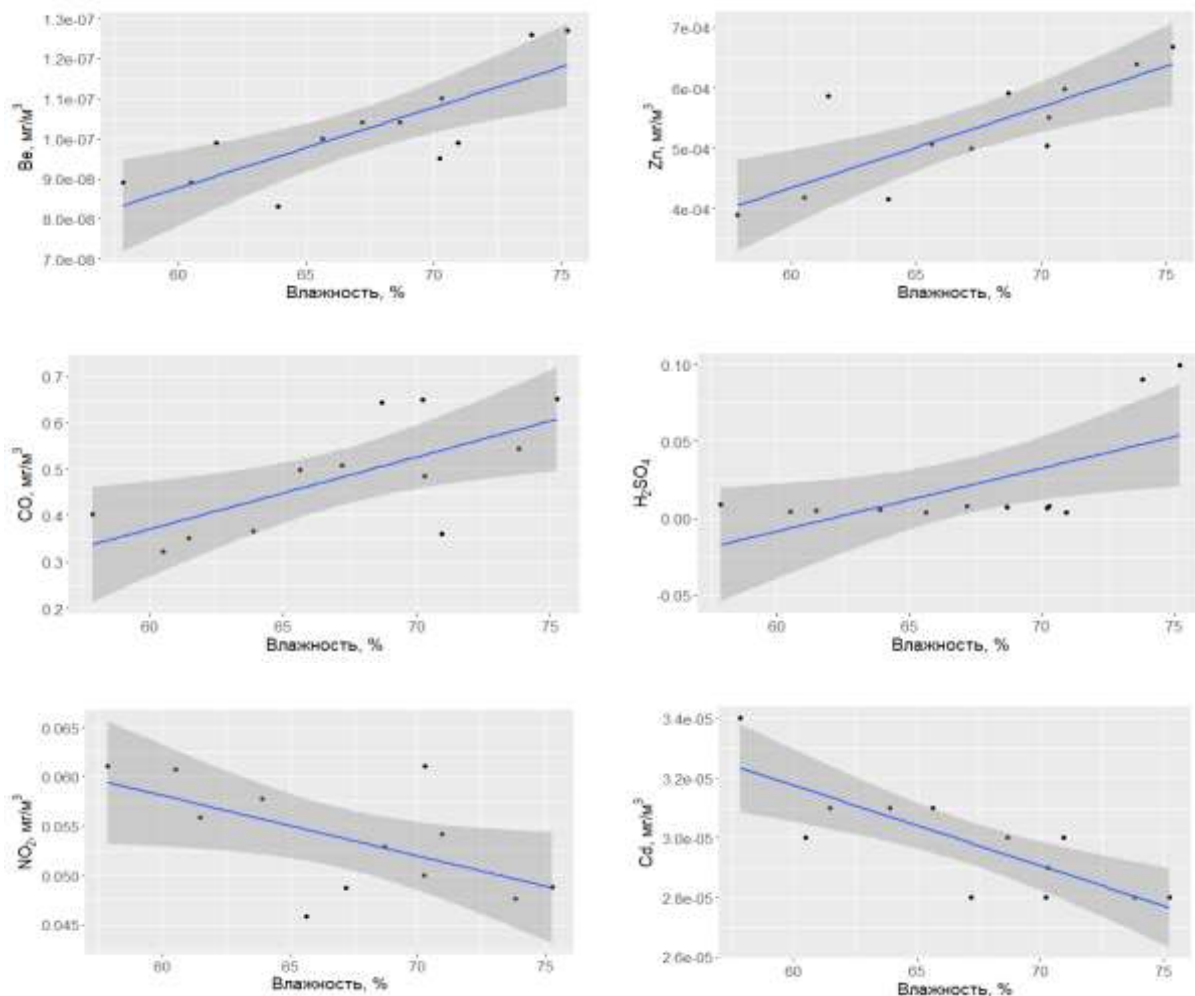
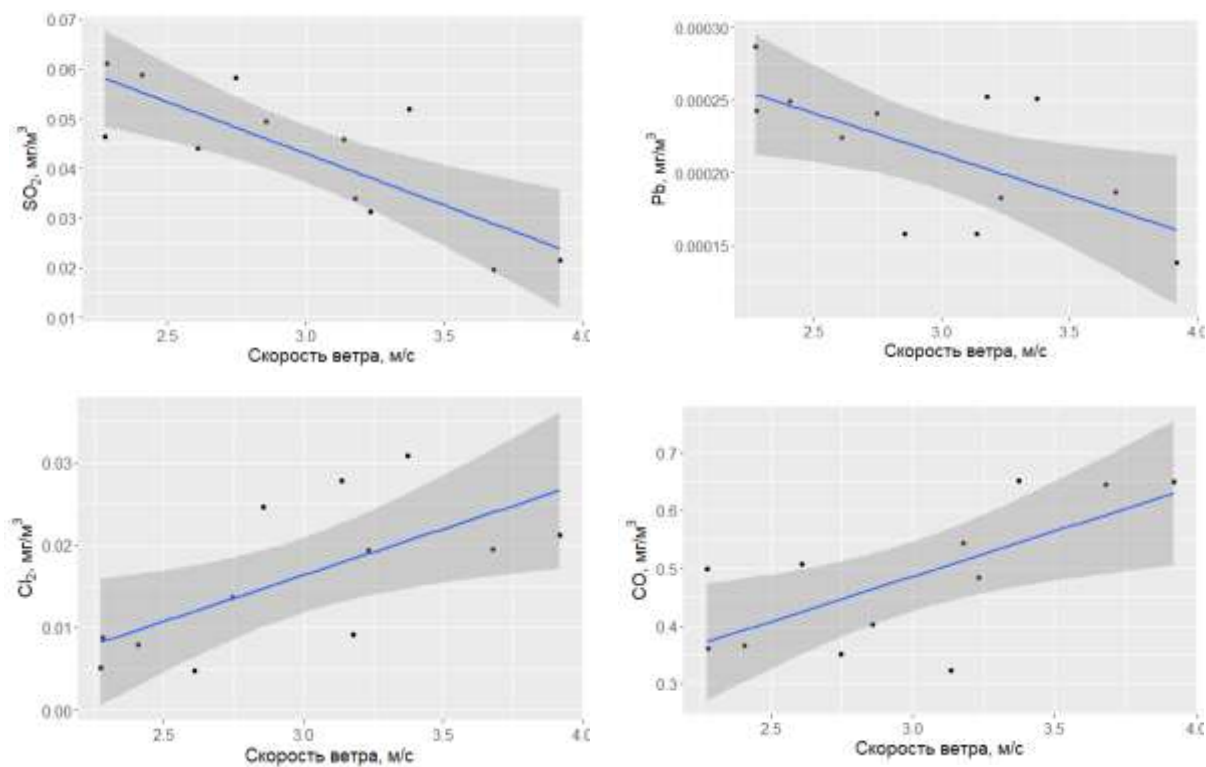
Анализ коэффициентов корреляции между различными атмосферными загрязнителями позволил выявить некоторые статистически значимые взаимосвязи, которые вероятно могут отразить особенности формирования химического состава воздуха и потенциальные источники загрязнения. Так наличие большого количества значимых межкомпонентных корреляций могут свидетельствовать о комплексной природе загрязнения, где один источник выбрасывает сразу несколько загрязнителей, либо имеется вклад различных источников. Это типично для предприятий черной и цветной металлургии, ТЭЦ, химических производств.

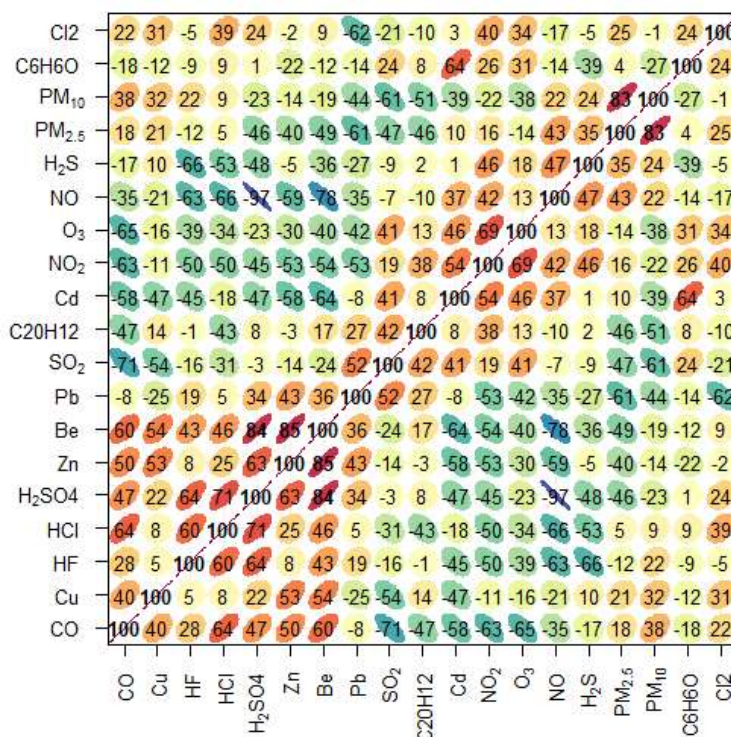
Сильная положительная корреляция между концентрациями PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub> ( $r = 0.9$ ) указывает на их общее происхождение. Основными источниками этих частиц являются выбросы от сжигания ископаемого топлива, почвенная, дорожная, строительная пыль и вторичные аэрозолеобразующие процессы [16...17].

Отрицательные корреляции между оксидом углерода (CO), диоксидом азота (NO<sub>2</sub>) и озоном (O<sub>3</sub>) могут указывать на фотохимические реакции, в которых неметановые углеводороды и оксид азота (NO) находясь в атмосфере, в которой также присутствуют водяной пар и кислород, под действием ультрафиолетового солнечного излучения преобразуются в формальдегид (H<sub>2</sub>CO), озон и диоксид азота [18].





Рисунок 3. Зависимость концентрации Be, Zn, CO, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, Cd, от влажностиРисунок 4. Зависимость концентрации SO<sub>2</sub>, Pb, Cl<sub>2</sub>, CO от силы ветра



**Рисунок 5.** Корреляционная матрица загрязняющих веществ по г. Усть-Каменогорск

Озон сам непосредственно в атмосферу природными или антропогенными источниками не выбрасывается, а образуется в ходе фотохимических процессов из газов-предшественников ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_x$ , летучих органических соединений) [18...20]. В дневное время наблюдается динамическое равновесие между  $\text{O}_3$  и  $\text{NO}_2$ , поскольку  $\text{NO}_2$  фотолизуется с образованием  $\text{O}_3$ , а  $\text{O}_3$  реагирует с  $\text{NO}$ , образуя  $\text{NO}_2$  [21...22].

Сильная отрицательная корреляция между  $\text{CO}$  и  $\text{SO}_2$  может указывать на различные источники выбросов.  $\text{SO}_2$  в данном случае связан с промышленными процессами, тогда как  $\text{CO}$  – с неполным сгоранием топлива в зимний период.

Высокая положительная корреляция между  $\text{HF}$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $r = 0.64$ ), также между  $\text{HF}$  и  $\text{HCl}$  ( $r = 0.6$ ) может указывать на совместное присутствие этих кислотных компонентов в выбросах от промышленных предприятий, в частности от ТЭЦ и химических производств. Такая связь представляет особую экологическую значимость, поскольку обе компоненты способны вызывать кислотные осадки, негативно влияющие на здоровье населения и окружающую среду [23].

#### **Корреляционный анализ по г. Павлодар**

В таблице 2 представлены данные по анализу корреляционных связей между концентрациями атмосферных загрязняющих веществ и ключевыми метеорологическими параметрами (температура, давление, влажность, скорость ветра) в г. Павлодар.

##### **Влияние температуры**

Основными загрязнителями, реагирующими на температурные изменения атмосферы г. Павлодар, являются оксид азота ( $\text{NO}$ ) и озон ( $\text{O}_3$ ). Так, прослеживается умеренная отрицательная связь между температурой и наличием в воздухе  $\text{NO}$  ( $r = -0.63$ ) и умеренная положительная связь по отношению к  $\text{O}_3$  ( $r = 0.65$ ).

Таблица 2

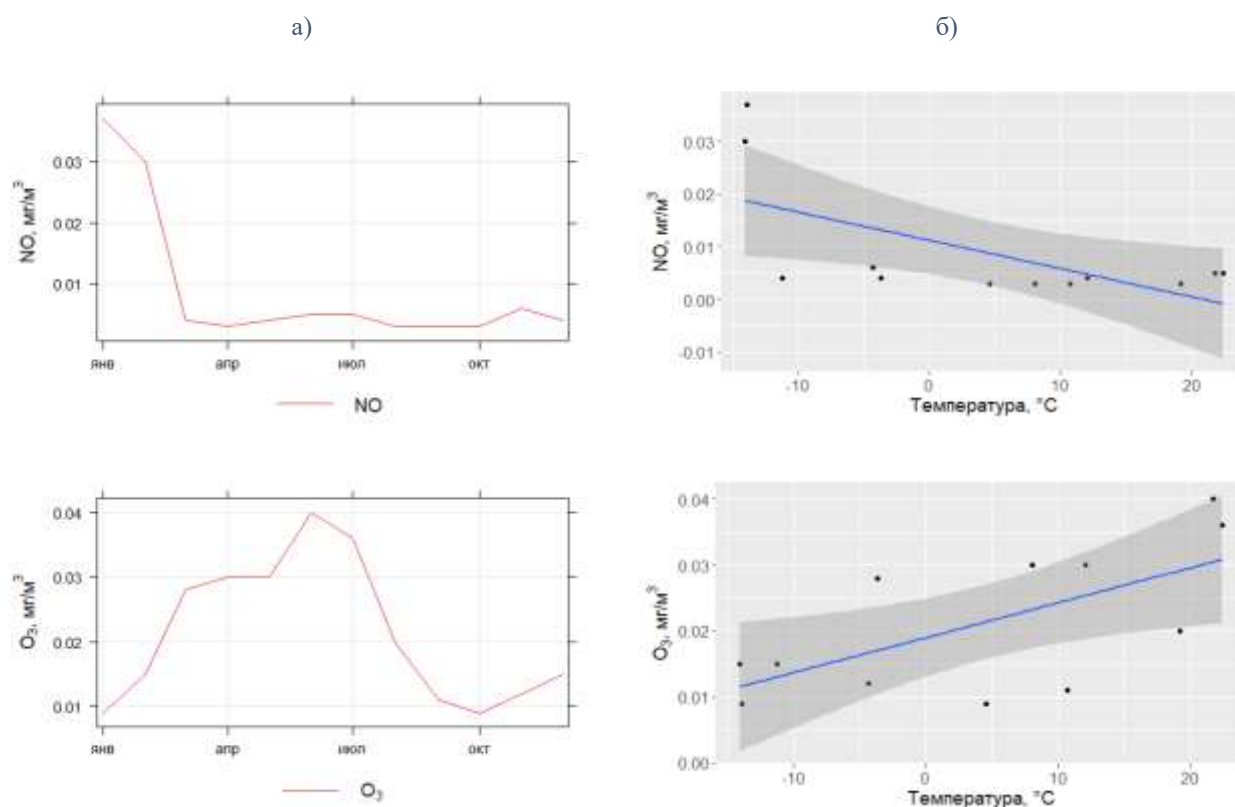
Корреляционные зависимости между метеопараметрами и содержанием загрязнителей в воздухе г. Павлодар

| Исследуемый метеопараметр | pm10  | SO <sub>2</sub> | CO          | NO <sub>2</sub> | NO           | O <sub>3</sub> | H <sub>2</sub> S | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O | Cl <sub>2</sub> | HCl          |
|---------------------------|-------|-----------------|-------------|-----------------|--------------|----------------|------------------|---------------------------------|-----------------|--------------|
| Температура               | 0.58  | -0.21           | -0.55       | -0.57           | <b>-0.63</b> | <b>0.65</b>    | 0.08             | 0.00                            | 0.26            | 0.38         |
| Давление воздуха          | -0.49 | 0.29            | <b>0.66</b> | 0.35            | 0.40         | <b>-0.70</b>   | -0.13            | 0.00                            | -0.19           | <b>-0.59</b> |
| Влажность                 | -0.24 | 0.04            | 0.31        | 0.34            | 0.37         | <b>-0.59</b>   | 0.24             | 0.00                            | 0.07            | -0.28        |
| Скорость ветра            | -0.56 | 0.03            | 0.08        | 0.34            | 0.47         | -0.17          | 0.08             | 0.00                            | -0.39           | -0.06        |

\* коэффициенты корреляции при уровне значимости 0.05 выделены жирным шрифтом

На рисунках 19...22 показаны сезонные колебания концентраций данных загрязнителей, а также графики зависимости их концентраций от температуры воздуха.

Из рисунка 19 видно, что максимальные значения концентраций NO наблюдались в первые зимние месяцы, далее с марта месяца концентрация NO резко снизилась и практически не менялась на протяжении года. Возможно, это связано с увеличением выбросов NO при сжигании ископаемого топлива в зимний период, что в совокупности со слабой вертикальной диффузией в холодное время года привело к росту загрязнения. Как видно из рисунка 20, с повышением температуры концентрация NO снижается. Такой тренд может указывать как на снижение выбросов от отопительных систем, усиление фотохимических реакций, протекающих при высоких температурах, так и возможно на усиление атмосферной турбулентности, способствующей рассеиванию NO.



**Рисунок 6.** Графики а) сезонных колебаний концентрации NO, O<sub>3</sub> и б) зависимости концентрации NO, O от температуры

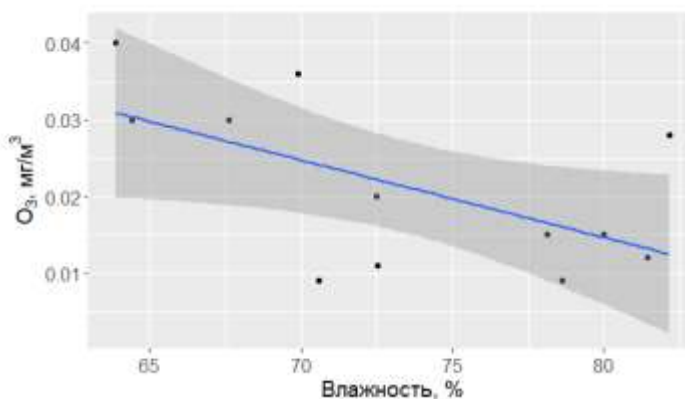
Концентрация O<sub>3</sub> варьируется в зависимости от времени года. Максимальные значения наблюдаются в весенне-летний период, минимальные значения приходятся на осень и зиму (рисунок 6). Это свидетельствует о сезонной зависимости концентрации O<sub>3</sub>, связанной с изменениями солнечной активности, фотохимических процессов и



атмосферных условий. Линия тренда с доверительным интервалом показывает устойчивую связь, чем выше температура – тем выше концентрация озона (рисунок 6), что подтверждает фотохимическое происхождение  $O_3$ .

#### *Влияние влажности*

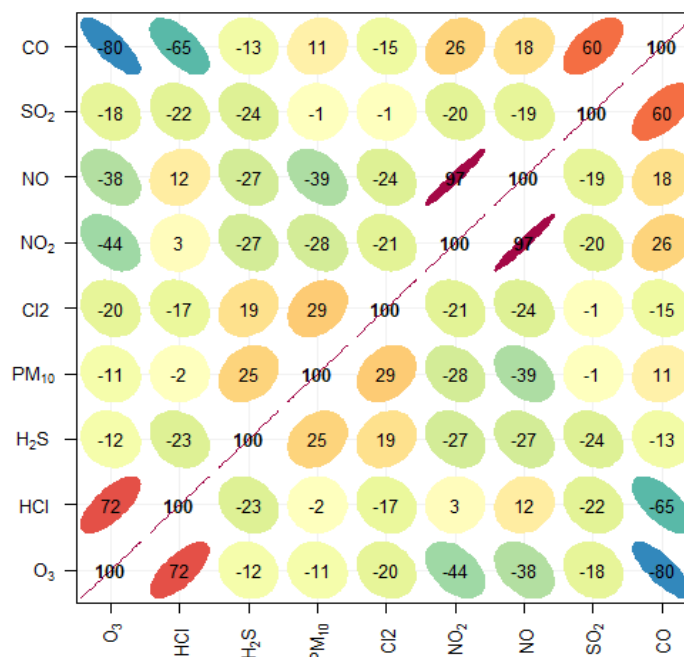
На рисунке 7 показана зависимость концентрации  $O_3$  от влажности. С увеличением влажности концентрация озона снижается, что может быть связано с тем, что при высокой влажности усиливаются процессы разрушения озона за счет активного взаимодействия с водяным паром [24].



**Рисунок 7.** Зависимость концентрации  $O_3$  от влажности

#### *Взаимосвязь между загрязняющими веществами*

На рисунке 8 представлена матрица загрязняющих веществ по г. Павлодар. Анализ корреляционной матрицы позволил выявить связи между некоторыми атмосферными загрязнителями и оценить возможные источники их образования, а также взаимного влияния. Так, наблюдается сильная положительная корреляция между содержанием  $NO_2$  и  $NO$  ( $r = 0.97$ ), что может указывать на общий источник выбросов – чаще всего это автотранспорт и процессы сжигания топлива [25].



**Рисунок 8.** Корреляционная матрица загрязняющих веществ по г. Павлодар

Сильная отрицательная корреляция между CO и O<sub>3</sub> ( $r = -0.80$ ), как уже было указано ранее, может указывать на участие CO в фотохимических реакциях образования озона.

Умеренная положительная корреляция между SO<sub>2</sub> и CO может указывать на возможные общие источники образования: сжигание угля, мазута, дизельного топлива, промышленные выбросы. Так, например, загрязняющие вещества, выбрасываемые автомобильными двигателями, включают CO<sub>2</sub>, CO, углеводороды, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> и твердые частицы [26...28]. Впоследствии в атмосфере в результате химических реакций образуются вторичные загрязнители, включая NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, углеводороды, серную кислоту и различные оксиды азота – образующие азотную кислоту и нитратные аэрозоли. Сжигание угля также приводит к выделению большого количества газообразных и твердых загрязнителей, включая SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, тяжелые металлы и бензопирен, негативно влияющих на здоровье человека [27...30].

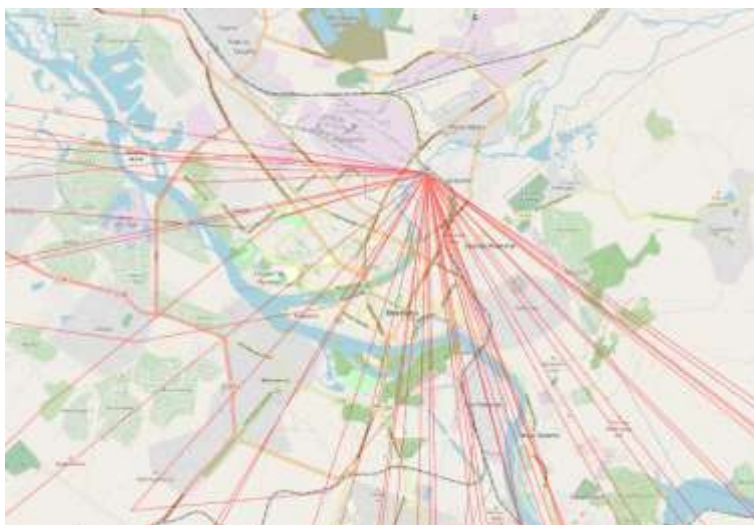
Умеренная положительная корреляция между O<sub>3</sub> и HCl ( $r = 0.72$ ) может указывать на общие источники – промышленные выбросы, выхлопные газы, сжигание мусора, приводящие к выбросу галогеносодержащих соединений, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> и т.д., и косвенно приводящие к образованию O<sub>3</sub> в результате протекания фотохимических реакций.

#### ***Выявление возможных источников загрязнения атмосферы с использованием модели HYSPLIT***

По данным сети мониторинга РГП «Казгидромет», в апреле, октябре и ноябре 2024 года уровень загрязнения воздуха г. Усть-Каменогорск оценивался как высокий, в остальные месяцы как повышенный. Уровень загрязнения атмосферного воздуха в г. Павлодар в январе и октябре 2024 года оценивался как высокий, в остальные месяцы как повышенный.

##### **г. Усть-Каменогорск.**

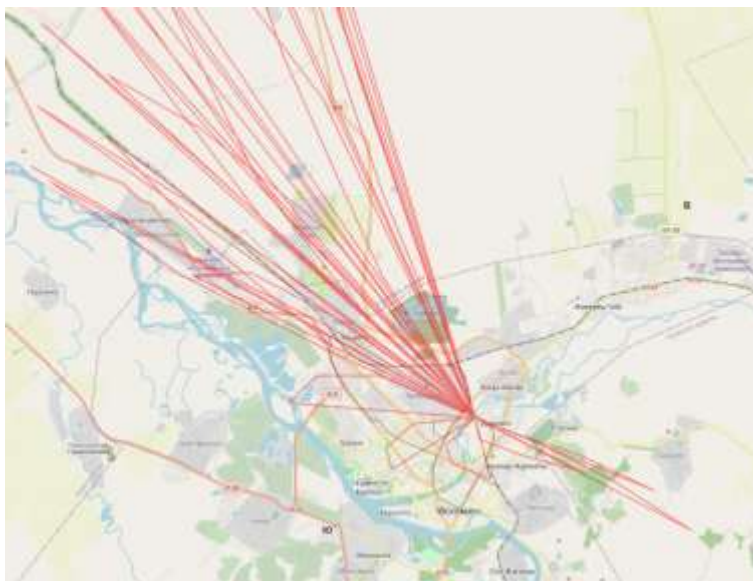
В апреле уровень загрязнения атмосферного воздуха г. Усть-Каменогорск определялся значением стандартного индекса (СИ = 5.0) и наибольшей повторяемости (НП = 10 %) по сероводороду (H<sub>2</sub>S) в районе поста №4 (ул. Широкая, 44). Для данного пункта были построены обратные траектории движения воздушных масс, т.е. траектории показывающие направления откуда пришли эти воздушные массы прежде, чем достигли расположения метеостанции (рисунок 9). Траектории рассчитывались на 9 апреля 2024 г., как наиболее загрязненного дня по H<sub>2</sub>S (0.037 мг/м<sup>3</sup>). Запуск траекторий производился для каждого часа (с 0 до 23 ч), высота в расчетной точке составила 10 м, т.к. на этой высоте проводятся стандартные метеорологические наблюдения за скоростью и направлением ветра [31], продолжительность траекторий составила 3 часа.



**Рисунок 9.** Траектории движения воздушных масс 9 апреля 2024 г.

Основные 2 направления, откуда приходили воздушные массы 9 апреля 2024 года, это южное (Ю) и западное направления (З). В меньшей степени выделяются юго-западное (ЮЗ) и юго-восточное (ЮВ) направления. В виду отсутствия данных о почасовых концентрациях загрязняющих веществ по каждой метеостанции, определить локальные источники загрязнения  $H_2S$  не представляется возможным. Из всех возможных источников образования  $H_2S$  можно предположить следующие: природные источники, очистные сооружения, выбросы автомобильного транспорта, дым от сжигания каменного угля [32...36].

В октябре месяце уровень загрязнения атмосферного воздуха г. Усть-Каменогорск определялся значением СИ=5.4 (высокий уровень) и НП=9% (повышенный уровень) по  $H_2S$  в районе поста №4 (ул. Широкая, 44). Наиболее загрязненным днем по выбросам  $H_2S$  оказался 2 октября. Обратные траектории, построенные для данного дня, представлены на рисунок 10.

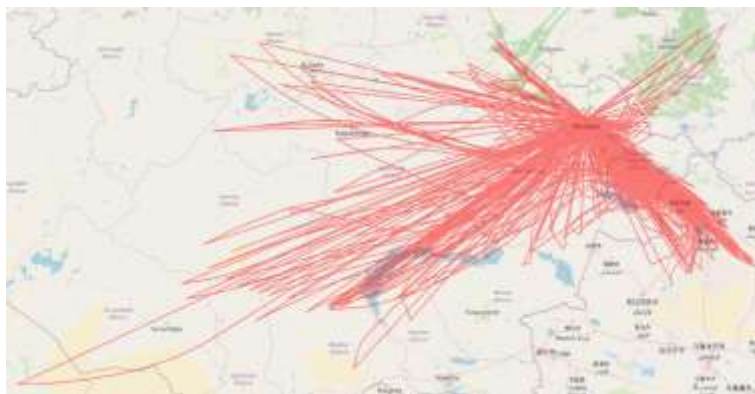


**Рисунок 10.** Траектории движения воздушных масс 2 октября 2024 г.

Основное направление поступления воздушных масс в этот день это северо-западное направление (СЗ). Также выделяется ЮВ направление. Остальные потоки выражены слабо.

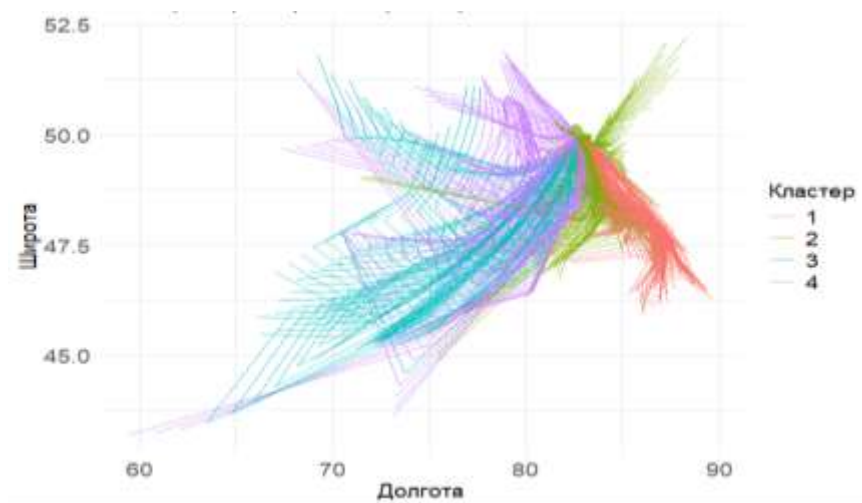
В ноябре месяце уровень загрязнения атмосферного воздуха г. Усть-Каменогорск определялся значением СИ=6.0 (высокий уровень) по хлору в районе поста №7 (ул. М. Тынышпаева, 126) и НП=12% (повышенный уровень) по хлороводороду в районе поста №1 (ул. Рабочая, 6). Так как в бюллетенях РГП «Казгидромет» отсутствовали ежедневные данные по хлору и хлороводороду, то обратные траектории рассчитывались на весь месяц. Запуск траекторий производился каждые 3 часа, высота в расчетной точке составила 10 м, продолжительность траекторий – 24 часа. Полученные визуализации представлены на рисунках 11...12.

При анализе полученных траекторий (рисунок 11) можно увидеть, что за 24 часа воздушные потоки могут распространяться на сотни и тысячи километров, таким образом нельзя исключить влияние на загрязнение г. Усть-Каменогорск трансграничного переноса загрязнителей [37]. Преимущественное направление ветра в данный период – ЮВ, остальные направления менее выражены.



**Рисунок 11.** Траектории движения воздушных масс в ноябре 2024 г.

Анализ кластеров обратных траекторий демонстрирует высокую степень вариативности в направлениях движения воздушных потоков и подтверждает сложный характер циркуляции воздушных масс (рисунок 12).



**Рисунок 12.** Кластеризация траекторий движения воздушных масс в ноябре 2024 г.

#### г. Павлодар

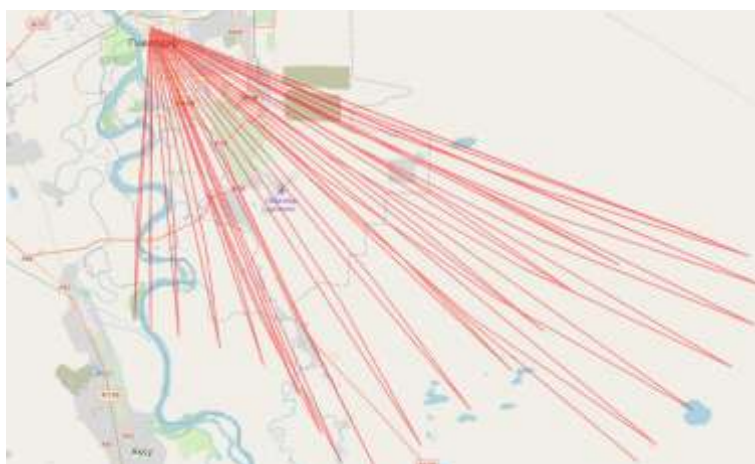
В январе 2024 года уровень загрязнения атмосферного воздуха г. Павлодар определялся значением СИ = 4.6 (повышенный уровень) по оксиду азота и НП = 34 % (высокий уровень) по диоксиду азота в районе поста №4 (ул. Каз. Правды). Наиболее загрязненным днем по концентрации диоксида азота оказался 31 января 2024 г. ( $0.518 \text{ мг/м}^3$ ). На рисунке 13 представлены обратные траектории движения воздушных масс.

Преобладающее направление ветра – Ю и ЮВ. В качестве локальных источников образования оксида и диоксида азота могут быть автотранспорт и выбросы от сжигания топлива. Также, как видно из рис. 29, данные загрязнители могут быть привнесены и со стороны г. Аксу Павлодарской области, где также имеются промышленные предприятия.

В октябре месяце уровень загрязнения атмосферного воздуха г. Павлодар определялся значением СИ=9.3 (высокий уровень) по оксиду углерода в районе поста №7 (ул. Торайгырова-Дюсенова) и НП=5% (повышенный уровень) по оксиду углерода в районе поста № 4 (ул. Каз. Правды). Наиболее загрязненным днем по концентрации оксида углерода оказался 5 октября 2024 г. ( $50 \text{ мг/м}^3$ ) (рисунок 14).



**Рисунок 13.** Траектории движения воздушных масс 31 января 2024 г.



**Рисунок 14.** Траектории движения воздушных масс 5 октября 2024 г.

Преобладающее направление ветра за эти сутки ЮВ. Предположительные источники оксида углерода – автотранспорт и выбросы от сжигания ископаемого топлива.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ атмосферных данных двух индустриальных городов Казахстана выявил статистически значимые зависимости между концентрациями загрязняющих веществ и метеорологическими параметрами. Установлено, что температура оказывает решающее влияние на уровни  $\text{SO}_2$  и  $\text{CO}$  в Усть-Каменогорске, а в Павлодаре – на концентрации  $\text{NO}$  и  $\text{O}_3$ . Корреляционные зависимости влажности и скорости ветра позволили оценить возможные механизмы рассеивания и накопления загрязнителей. Дополнительно выявлены межкомпонентные корреляции, указывающие на общее происхождение некоторых загрязнителей (например,  $\text{PM}_{2.5}$  и  $\text{PM}_{10}$ ), а также на фотохимические процессы, влияющие на концентрации  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{O}_3$ . Анализ обратных траекторий показал, что в течение суток происходят значительные изменения в направлениях ветра, при этом воздушные потоки могут распространяться на сотни и тысячи километров, влияя на перенос загрязняющих веществ. Кластеризация обратных траекторий позволила выявить сложный характер атмосферной циркуляции и продемонстрировала разнообразие траекторий поступления воздушных потоков в зону исследования.



Перспективным направлением для дальнейших исследований является применение более сложных моделей для анализа нелинейных зависимостей, моделирования распространения и рассеивания загрязнителей, для чего потребуется получение и использование более детализированных данных по содержанию загрязнителей в воздухе исследованных городов, чем в информации, предоставляемой РГП «Казгидромет».

#### ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании, получены авторами из одного источника: РГП «Казгидромет» МЭПР РК.

#### ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – ЖАБ, НЖМ, КШМ; управление данными – ААМ, АЖТ, ННБ; формальный анализ – МРА, ЕНП, ЛБК; методология – НЖМ, СЕС; программное обеспечение – ВНМ; руководство – ЖАБ, НЖМ; визуализация – СЕС; написание исходного текста – ЖАБ, СЕС; написание и редактирование окончательного текста ЖАБ, СЕС.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR27101493 «Разработка стратегии снижения загрязнения воздуха в промышленных городах Казахстана, основанная на идентификации распределения источников загрязнения»).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крюкова С.В., Симакина Т.Е. Оценка влияния метеорологических параметров на концентрации загрязняющих веществ в атмосфере Санкт-Петербурга // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – №5-2. – С. 299-305.
2. Кряжевских К.А., Дорофеева Д.А. Проблема загрязнения городов и пути решения // Вопросы российской юстиции. – 2023. – №24. – С. 318-324.
3. Давыдова И.С., Гапоненко А.В. Проблема загрязнения атмосферного воздуха в городах // Sciences of Europe. – 2017. – №14-2(14) – С. 3-5.
4. Информационные бюллетени о состоянии окружающей среды Республики Казахстан. – [Электрон. ресурс]. – <https://www.kazhydromet.kz/ru/ecology/ezhemesyachnyy-informacionnyy-byulleten-o-sostoyanii-okruzhayuschey-sredy>, дата обращения: 22.05.2025
5. Ежедневные бюллетени состояния воздушного бассейна – [Электрон. ресурс]. – <https://www.kazhydromet.kz/ru/ecology/ezhednevnyy-byulleten-sostoyaniya-vozdushnogo-basseyna-nmu/2024>, дата обращения: 22.05.2025
6. Карта текущих и прогнозных данных качества атмосферного воздуха Республики Казахстан – [Электрон. ресурс]. – [http://ecodata.kz:3838/app\\_dem\\_visual/](http://ecodata.kz:3838/app_dem_visual/), дата обращения: 07.05.2025 г.
7. Carslaw D.C., Ropkins K. OpenAir – An R package for air quality data analysis. Environmental Modelling & Software, 2012, Vol. 27-28. Pp. 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>
8. Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., and Ngan, F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. Bull. Amer. Meteor. Soc., 2015, Vol. 96, pp. 2059-2077, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
9. Василевич М.И., Щанов В.М. Применение траекторного подхода с использованием модели HYSPLIT при оценке переноса воздушных масс от возможных источников эмиссии. Известия Коми научного центра УрО РАН – 2019 – №3 (39) – С. 18-22.
10. Pérez I., Artuso F., Mahamud M., Kulshrestha U., Sánchez M.L., García M. Applications of Air Mass Trajectories. Advances in Meteorology, 2015, pp. 1-20, <https://doi.org/10.1155/2015/284213>
11. Global Data Assimilation System (GDAS1). NOAA Air Resources Laboratory – [Электрон. ресурс]. – <https://www.ready.noaa.gov/data/archives/gdas1/>, дата обращения: 22.05.2025
12. Яковенко В.А. Хлор в атмосферном воздухе населенных мест // Гигиена и санитария. – 1936. – №9. – С. 8-15.
13. Потапов П.К. Поражение лёгких при интоксикации продуктами пиролиза хлорсодержащих полимерных материалов / диссертация на соискание учёной степени кандидата медицинских наук. Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова» министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург. – 2021 г. – 128 с.
14. Информационно-коммуникационная платформа Zakon.kz – [Электрон. ресурс]. – <https://www.zakon.kz/sobytiia/6477947-v-ustkamenogorske-zafiksirovali-prevyshenie-khlora-provoditsya-proverka.html>, дата обращения: 30.05.2025
15. Friendly M., Corrgrams: Exploratory Displays for Correlation Matrices. The American Statistician, 2002, 56 (4), pp. 316-324 <https://doi.org/10.2307/3087354>
16. Zhang G., Ding C., Jiang X., Pan G., Wei X., Sun Y. Chemical Compositions and Sources Contribution of Atmospheric Particles at a Typical Steel Industrial Urban Site. Sci Rep., 2020, Vol.10(1):7654. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64519-x>
17. Pant P., Harrison Roy M., Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review, Atmospheric Environment, 2013, Vol. 77, pp. 78-97. ISSN 1352-2310. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.028>
18. Белан Б.Е., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н. Зависимость образования озона в приземном слое от температуры воздуха // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – №11. – С. 971-979. – <https://doi.org/10.15372/AOO20171110>

19. Белан Б.Д. Тропосферный озон. 5. Газы – предшественники озона. // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22. №03. – С. 230-268.
20. Ravina M., Caramitti G., Panepinto D. et al. Air quality and photochemical reactions: analysis of NO<sub>x</sub> and NO<sub>2</sub> concentrations in the urban area of Turin, Italy. *Air Qual Atmos Health*, 2022, Vol.15, pp. 541-558. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01168-1>
21. Kanaya Y., Masato F., Hajime A., Nobuyuki T., Yuichi K., Yoko Y., Makoto K., Yutaka K.. Urban photochemistry in central Tokyo: 2. Rates and regimes of oxidant (O<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub>) production. *Journal of Geophysical Research*, 2008, Vol. 113. D06301. <https://doi.org/10.1029/2007JD008671>
22. Sanford S., The relation between ozone, NO<sub>x</sub> and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. *Atmospheric Environment*, 1999, Vol. 33, Issue 12. pp. 1821-1845. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00345-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00345-8)
23. Чомаева М.Н. Взаимовлияние негативного воздействия кислотных осадков на окружающую среду и человека // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2020. – №5-3. – С. 27-29
24. Котельников С.Н., Степанов Е.В. Роль водного аэрозоля в разложении озона в приземной атмосфере // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2019. – №9. – С. 23-30.
25. Carslaw D.C., & Beevers S.D. Estimations of road vehicle primary NO<sub>2</sub> exhaust emission fractions using monitoring data in London. *Atmospheric Environment*, 2005, Vol. 39(1), pp.167–177. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.08.053>
26. State of Air Report 2005. A report on the state of the air in South Africa, 2009 – Электронный ресурс: [https://www.gov.za/sites/default/files/gcis\\_document/201409/state-air-report-2005.pdf](https://www.gov.za/sites/default/files/gcis_document/201409/state-air-report-2005.pdf), дата обращения: 23.05.2025
27. Folinsbee L.J. Human health effects of air pollution. *Environ. Health Perspect.*, 1993, Vol.100, pp. 45-56. <https://doi.org/10.1289/ehp.9310045>
28. Kazemi G.M., Laneve G., Rezaei H. et al. Monitoring Trends of CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, and O<sub>3</sub> Pollutants Using Time-Series Sentinel-5 Images Based on Google Earth Engine. *Pollutants*, 2023, Vol.3, pp. 255-279. <https://doi.org/10.3390/pollutants3020019>
29. Abdelkareem M., Tan Y., El Attar R.M. et al. Assessing the emissions of CO, SO<sub>2</sub>, and NO<sub>x</sub> and predicting potential zones of CO concentration from sugarcane factories in Egypt. *J. Earth Syst. Sci.*, 2020, Vol.129, №91. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-1339-7>
30. Monks P.S., Granier C., Fuzzi S. et al. Atmospheric composition change – global and regional air quality. *Atmospheric Environment*, 2009. Vol.43, Issue 33. pp. 5268-5350, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.08.021>
31. Приказ Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 14 июня 2017 года № 345. Об утверждении Правил метеорологического обеспечения гражданской авиации – [Электрон. ресурс]. – <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1700015358>, дата обращения: 22.06.2025
32. Kourtidis K., Kelesis A., & Petrakakis M. Hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) in urban ambient air. *Atmospheric Environment*, 2008. Vol. 42(32), pp.7476–7482. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.05.066>
33. Traven L., Linšak Ž., Crvelin G. et al. Atmospheric parameters play an important role in driving hydrogen sulphide concentrations in ambient air near waste management centres. *Environ. Monit Assess.* 2023, Vol. 195, №1451, <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12047-2>
34. Галкин С. Исследование вклада угольной энергетики в загрязнение атмосферного воздуха города усть-каменогорска сероводородом // Вестник ВКТУ. – 2022. – Вып.4. – С. 8-19
35. Масштабное исследование воздуха г. Усть-Каменогорска – [Электрон. ресурс]. – [https://nauka.kz/page.php?page\\_id=1001&lang=1&news\\_id=10037&new](https://nauka.kz/page.php?page_id=1001&lang=1&news_id=10037&new), дата обращения: 22.06.2025
36. Qian Y., Wenjia W., Jiale C., Han L., Zimeng Zh., Piaopiao K. Lei D., Zhang L., Zhao Y. Surface-Air Exchanges of H<sub>2</sub>S and SO<sub>2</sub> in an Urban Wetland in Eastern China. *Science of The Total Environment*, 2024, Vol. 951, pp.175701, ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175701>
37. Кондратьев И.И. Атмосферный трансграничный перенос загрязняющих веществ из центров эмиссии восточной Азии на юг Дальневосточного региона России // Вестник ДВО РАН. – 2008. – №1. – С. 107-112.

## REFERENCES

1. Kryukova S.V., Simakina T.E. (2015). Otsenka vliyaniya meteorologicheskikh parametrov na kontsentratsii zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfere Sankt-Peterburga [Assessment of the influence of meteorological parameters on the concentration of pollutants in the atmosphere of St. Petersburg]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, pp. 299-305 [in Russian].
2. Kryazhevskikh K.A., Dorofteeva D.A. (2023) Problema zagryazneniya gorodov i puti resheniya [The problem of urban pollution and solutions]. *Voprosy rossiiskoi yustitsi*, No.24. pp. 318-324 [in Russian].
3. Davydova I.S., Gaponenko A.V. (2017) Problema zagryazneniya atmosfernogo vozdukha v gorodakh [The problem of air pollution in cities] *Sciences of Europe*, No.14-2(14). pp. 3-5 [in Russian].
4. Informatsionnye byulleteni o sostoyanii okruzhayushchei sredy Respubliki Kazakhstan – Elektronnyi resurs: <https://www.kazhydromet.kz/ru/ecology/ezhemesyachnyy-informacionnyy-byulleten-o-sostoyanii-okruzhayushchei-sredy>, date of access: 22.05.2025 [in Russian].
5. Ezhednevnye byulleteni sostoyaniya vozdukhnoy basseina – Elektronnyi resurs: <https://www.kazhydromet.kz/ru/ecology/ezhnednevnyy-byulleten-sostoyaniya-vozdukhnoy-basseina-nmu/2024>, date of access: 22.05.2025 [in Russian].
6. Map of current and forecast atmospheric air quality data for the Republic of Kazakhstan – [Electronic resource]. – [http://ecodata.kz:3838/app\\_dem\\_visual/](http://ecodata.kz:3838/app_dem_visual/), date of access: May 7, 2025.
7. Carslaw D.C., Ropkins K. (2012) OpenAir – An R package for air quality data analysis // *Environmental Modelling & Software*, Vol. 27-286 pp. 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>
8. Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., and Ngan F. (2015) NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.96, pp. 2059-2077, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
9. Vasilevich M.I., Shchanov V.M. (2019) Primenenie traektorного podkhoda s ispol'zovaniem modeli HYSPLIT pri otsenke perenosa vozdukhnykh mass ot vozmozhnykh istochnikov emissii [Application of the trajectory approach using the HYSPLIT model in assessing the transfer of air masses from potential emission sources]. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN*, №3 (39). pp.18-22 [in Russian].

10. Pérez I., Artuso F., Mahamud M., Kulshrestha U., Sánchez M.L., García M. (2015) Applications of Air Mass Trajectories. *Advances in Meteorology*, pp. 1-20, <https://doi.org/10.1155/2015/284213>
11. Global Data Assimilation System (GDAS1). NOAA Air Resources Laboratory <https://www.ready.noaa.gov/data/archives/gdas1/>
12. Yakovenko V.A. (1936) Khlor v atmosfernom vozdukhie naselennykh mest [Chlorine in the atmospheric air of populated areas]. *Gigiena i sanitariya*. – No.9. – pp. 8-15 [in Russian].
13. Potapov P.K. (2021) Porazhenie legkikh pri intoksikatsii produktami piroliza khlorosoderzhashchikh polimernykh materialov [Lung damage due to intoxication with pyrolysis products of chlorine-containing polymeric materials]. *Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata meditsinskikh nauk. Federal'noe gosudarstvennoe voyennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Voenno-meditsinskaya akademiya imeni S.M. Kirova» ministerstva oborony Rossiiskoi Federatsii, Sankt-Peterburg*, pp. 128. [in Russian].
14. Informatsionno-kommunikatsionnaya platforma Zakon.kz – Elektronnyi resurs: <https://www.zakon.kz/sobytiia/6477947-v-ustkamenogorske-zafiksirovali-prevysenie-khlora-provoditsya-proverka.html>, date of access: 30.05.2025 [in Russian].
15. Friendly M. (2002) Corgrams: Exploratory Displays for Correlation Matrices. *The American Statistician*, 2002, 56 (4), pp. 316-324 <https://doi.org/10.2307/3087354>
16. Zhang G., Ding C., Jiang X., Pan G., Wei X., Sun Y. (2020) Chemical Compositions and Sources Contribution of Atmospheric Particles at a Typical Steel Industrial Urban Site. *Sci Rep.*, Vol.10(1):7654, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64519-x>
17. Pant P., Harrison Roy M. (2013) Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review, *Atmospheric Environment*, Vol. 77, pp. 78-97, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.028>
18. Belan B.E., Savkin D.E., Tolmachev G.N. (2017) Zavisimost' obrazovaniya ozona v prizemnom sloe ot temperatury vozdukh [Dependence of ozone formation in the surface layer on air temperature]. *Optika atmosfery i okeana*, No.11, pp. 971-979, <https://doi.org/10.15372/AOO20171110> [in Russian].
19. Belan B.D. (2009) Troposfernyi ozon. 5. Gazy – predshestvenniki ozona [Tropospheric ozone. 5. Gases - precursors of ozone]. *Optika atmosfery i okeana*, Vol.22, №3, pp. 230-268 [in Russian].
20. Ravina M., Caramitti G., Panepinto D. et al. (2022) Air quality and photochemical reactions: analysis of NO<sub>x</sub> and NO<sub>2</sub> concentrations in the urban area of Turin, Italy. *Air Qual Atmos Health*, Vol.15, pp. 541–558. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01168-1>
21. Kanaya Y., Fukuda M., Akimoto H., Takegawa N., Komazaki Y., Yokouchi Y., Koike M., Kondo Y. (2008) Urban photochemistry in central Tokyo: 2. Rates and regimes of oxidant (O<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub>) production. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, D06301, <https://doi.org/10.1029/2007JD008671>
22. Sanford Sillman (1999) The relation between ozone, NO<sub>x</sub> and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, Issue 12, pp. 1821-1845, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00345-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00345-8)
23. Chomaeva M.N. (2020) Vzaimovliyanie negativnogo vozdeistviya kislotnykh osadkov na okruzhayushchuyu sredu i cheloveka [The mutual influence of the negative impact of acid precipitation on the environment and humans] *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, №5-3, pp. 27-29 [in Russian].
24. Kotelnikov S.N., Stepanov E.V. (2019) Rol' vodnogo aerolya v razlozhenii ozona v prizemnoi atmosfere [The role of water aerosol in ozone decomposition in the surface atmosphere] *Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN*, №9, pp. 23-30 [in Russian].
25. Carslaw D.C., & Beevers S.D. (2005) Estimations of road vehicle primary NO<sub>2</sub> exhaust emission fractions using monitoring data in London. *Atmospheric Environment*, Vol. 39(1), pp.167–177. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.08.053>
26. State of Air Report 2005. (2009) A report on the state of the air in South Africa, – Elektronnyi resurs: [https://www.gov.za/sites/default/files/gcis\\_document/201409/state-air-report-2005.pdf](https://www.gov.za/sites/default/files/gcis_document/201409/state-air-report-2005.pdf), date of access: 23.05.25
27. Folinsbee L.J. (1993) Human health effects of air pollution. *Environ. Health Perspect.*, Vol.100, pp. 45-56. <https://doi.org/10.1289/ehp.9310045>
28. Kazemi G.M., Laneve G., Rezaei H. et al. (2023) Monitoring Trends of CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, and O<sub>3</sub> Pollutants Using Time-Series Sentinel-5 Images Based on Google Earth Engine. *Pollutants*, Vol.3, pp. 255-279. <https://doi.org/10.3390/pollutants3020019>
29. Abdelkareem M., Tan Y., El Attar R.M. et al. (2020) Assessing the emissions of CO, SO<sub>2</sub>, and NO<sub>x</sub> and predicting potential zones of CO concentration from sugarcane factories in Egypt. *J. Earth Syst. Sci.*, Vol.129, №91. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-1339-7>
30. Monks P.S., Granier C., Fuzzi S. et al. (2009) Atmospheric composition change – global and regional air quality. *Atmospheric Environment*, Vol.43, Issue 33, pp. 5268-5350, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.08.021>
31. Prikaz Ministra po investitsiyam i razvitiyu Respubliki Kazakhstan ot 14 iyunya 2017 goda № 345. Ob utverzhdenii Pravil meteorologicheskogo obespecheniya grazhdanskoi aviatsii [Order of the Minister of Investment and Development of the Republic of Kazakhstan dated June 14, 2017 No. 345. On approval of the Rules for meteorological support of civil aviation] – Elektronnyi resurs: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1700015358>, date of access: 22.06.2025 [in Russian].
32. Kourtidis K., Kelesis A., & Petrakakis M. Hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) in urban ambient air (2008). *Atmospheric Environment*, Vol. 42(32), pp.7476–7482. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.05.066>
33. Traven L., Linšak Ž., Crvelin G. et al. (2023) Atmospheric parameters play an important role in driving hydrogen sulphide concentrations in ambient air near waste management centres. *Environ. Monit Assess.*, Vol. 195, №1451, <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12047-2>
34. Galkin S. (2022) Issledovanie vklada ugo'noi energetiki v zagryaznenie atmosfernogo vozdukh goroda ust'-kamenogorska serovodorodom [Study of the contribution of coal power engineering to atmospheric air pollution in the city of Ust-Kamenogorsk with hydrogen sulfide] *Vestnik VKTU*, Vyp.4, pp. 8-19 [in Russian].
35. Masshtabnoe issledovanie vozdukh g. Ust'-Kamenogorska [National Science Portal Large-scale study of air in Ust-Kamenogorsk] – Elektronnyi resurs: [https://nauka.kz/page.php?page\\_id=1001&lang=1&news\\_id=10037&new](https://nauka.kz/page.php?page_id=1001&lang=1&news_id=10037&new), date of access: 22.06.2025 [in Russian].
36. Qian Y., Wenjia W., Jiale C., Han L., Zimeng Zh., Piaopiao K. Lei D., Zhang L., Zhao Y. Surface-Air Exchanges of H<sub>2</sub>S and SO<sub>2</sub> in an Urban Wetland in Eastern China (2024). *Science of The Total Environment*, Vol. 951, pp.175701, ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175701>
37. Kondrat'ev I.I. (2008) Atmosferyni transgranichnyi perenos zagryaznyayushchikh veshchestv iz tsentrov emissii vostochnoi Azii na yug Dal'nevostochnogo regiona Rossii [Atmospheric transboundary transport of pollutants from emission centers in East Asia to the south of the Far Eastern region of Russia] *Vestnik DVO RAN*, №1, pp. 107-112 [in Russian].

# ҚАЗАҚСТАННЫҢ ИНДУСТРИЯЛЫҚ ҚАЛАЛАРЫНДА ЗАМАНАУИ АТМОСФЕРАЛЫҚ ТАЛДАУ ЖӘНЕ МОДЕЛЬДЕУ ЖҮЙЕЛЕРІН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП МЕТЕОРОЛОГИЯЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРДІҢ АУА САПАСЫНА ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Жанат А. Байгазинов<sup>1</sup> PhD, Саян Е. Сәлменбаев<sup>2\*</sup>, Нурлан Ж. Мухамедияров<sup>1,3</sup>, Касым Ш. Жумадилов<sup>4</sup> PhD, Медет Р. Актаев<sup>1</sup>, Лаура Б. Кенжина<sup>2</sup> PhD, Елена Н. Поливкина<sup>2</sup> PhD, Ажар Ж. Ташекова<sup>2</sup> PhD, Алмагуль А. Мухамедиярова<sup>5</sup>, Валерий Н. Монаенко<sup>2</sup>, Назира Н. Берікбол<sup>6</sup>.

<sup>1</sup> «Ядролық технологиялар паркі» АҚ, Курчатов, Қазақстан; baygazinov@pnt.kz, mukhamediyarov@pnt.kz, medet\_aktaev@mail.ru

<sup>2</sup> ҚР ҰЯО РМК Радиациялық қауіпсіздік және экология институтының филиалы, Курчатов, Қазақстан; salmenbayev@gmail.com, laurakenzhina@nnc.kz, polivkina@nnc.kz, esenzholova@nnc.kz, monaenko@nnc.kz

<sup>3</sup> «EventumLab» ғылыми-зерттеу орталығы» ЖШС, Семей, Қазақстан; mukhamediyarov@pnt.kz

<sup>4</sup> «Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КЕАҚ, Астана, Қазақстан; zhumadilovk@gmail.com

<sup>5</sup> «СемАз» ЖШС, Семей қ., Қазақстан; mukhamediyarova88@mail.ru

<sup>6</sup> «Шәкәрім университеті» КЕАҚ, Семей қ., Қазақстан; nazira\_berikbolova@mail.ru

Корреспондент автор: Саян Е. Сәлменбаев, [salmenbayev@gmail.com](mailto:salmenbayev@gmail.com)

## ТҮЙІН СӨЗДЕР

ауа сапасы,  
ластаушы заттар,  
метеорологиялық  
көрсеткіштер,  
корреляциялық талдау,  
ауа массасын тасымалдаудың  
кері траекториялар

### Мақала жайында:

Алынды: 03.07.2025

Қайта қаралды: 13.08.2025

Қабылданды: 22.09.2025

Жарияланды: 01.10.2025

## АБСТРАКТ

Бұл зерттеуде Қазақстанның екі өнеркәсіптік қаласы – Өскемен мен Павлодардағы метеорологиялық көрсеткіштер мен атмосфералық ластаушы заттардың концентрациялары арасындағы байланыс қарастырылды. Корреляциялық тәуелділіктерді талдау климаттық факторлар мен ластаушы заттардың арасындағы маңызды, қалыпты және әлсіз байланыстарды анықтауға мүмкіндік берді. Нәтижесінде Өскемен қаласында температура мен SO<sub>2</sub>, CO концентрацияларының, ал Павлодарда температура мен NO, O<sub>3</sub> деңгейлерінің арасында айтарлықтай байланыс анықталды. Сонымен қатар, жел жылдамдығы мен ылғалдылық ластаушы заттардың таралуы мен жиналуына ықпал ететіні көрсетілді. Фотохимиялық процестер мен ластану көздерін көрсететін құрам аралық корреляцияға ерекше назар аударылды. Кері траекторияларды талдау ауаның әртүрлі бағыттардан келетінін және ластаушы заттардың алыс қашықтықтан тасымалдануы мүмкін екенін көрсетті.

# ASSESSMENT OF THE IMPACT OF METEOROLOGICAL PARAMETERS ON AIR QUALITY IN INDUSTRIAL CITIES OF KAZAKHSTAN USING MODERN ATMOSPHERIC ANALYSIS AND MODELING SYSTEMS

Zhanat Baigazinov<sup>1</sup> PhD, Sayan Salmenbayev<sup>2\*</sup>, Nurlan Mukhamediyarov<sup>1,3</sup>, Kassym Zhumadilov<sup>4</sup> PhD, Medet Aktaev<sup>1</sup>, Laura Kenzhina<sup>2</sup> PhD, Elena Polivkina<sup>2</sup> PhD, Azhar Tashekova<sup>2</sup> PhD, Almagul Mukhamediarova<sup>5</sup>, Valery Monaenko<sup>2</sup>, Nazira Berikbol<sup>6</sup>

<sup>1</sup> JSC "Park of Nuclear Technologies", Kurchatov, Kazakhstan; baygazinov@pnt.kz, mukhamediyarov@pnt.kz, medet\_aktaev@mail.ru

<sup>2</sup> Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" of RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan; salmenbayev@gmail.com, laurakenzhina@nnc.kz, polivkina@nnc.kz, esenzholova@nnc.kz, monaenko@nnc.kz

<sup>3</sup> LLP "Scientific Research Center "EventumLab", Semey, Kazakhstan; mukhamediyarov@pnt.kz

<sup>4</sup> L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; zhumadilovk@gmail.com

<sup>5</sup> LLP "SemAz", Semey, Kazakhstan; mukhamediyarova88@mail.ru

<sup>6</sup> Shakarim University, Semey, Kazakhstan; nazira\_berikbolova@mail.ru

\* Corresponding author: Sayan Salmenbayev, [salmenbayev@gmail.com](mailto:salmenbayev@gmail.com)

---

**KEY WORDS**

---

air quality,  
pollutants,  
meteorological parameters,  
correlation analysis,  
backward trajectories of air  
masses transfer

**About article:**

Received: 03.07.2025

Revised: 13.08.2025

Accepted: 22.09.2025

Published: 01.10.2025

---

**ABSTRACT**

---

This paper examines the influence of meteorological parameters on air pollution levels in two industrial cities of Kazakhstan – Ust-Kamenogorsk and Pavlodar. The analysis is based on air quality monitoring data from both automatic and manual observation stations, as well as GDAS1 meteorological records for 2024. Data analysis was performed using RStudio and the OpenAir package. Correlation analysis revealed statistically significant relationships between meteorological conditions (temperature, humidity, wind speed) and concentrations of various pollutants, such as SO<sub>2</sub>, CO, NO, O<sub>3</sub>. Particular attention is paid to seasonal variations and photochemical processes affecting the formation of ozone and secondary pollutants. The backward trajectory method (SplitR) was applied to determine potential pollutant source directions, highlighting the contribution of both local and transboundary emissions. Cluster analysis of air mass trajectories confirmed the complex and multidirectional nature of atmospheric circulation.

---

**Примечание издателя:** заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).