

УДК 681.3

Лыченко Н.М.

Кыргызско-Российский Славянский университет, Бишкек, Кыргызстан

E-mail: nlychenko@mail.ru

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ И КОНЦЕНТРАЦИЙ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ PM_{2.5} В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ Г. БИШКЕК И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В МОДЕЛЯХ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Представлены результаты статистического и корреляционного анализа временных рядов метеопараметров (температуры атмосферного воздуха, точки росы, атмосферного давления, влажности воздуха, скорости ветра, интенсивности осадков) и концентраций твердых частиц PM_{2.5} в воздухе г. Бишкек за интервал наблюдений февраль 2019 г. – сентябрь 2023 г. Рассмотрены возможности применения результатов проведенного анализа в машинном обучении для построения прогноза уровня загрязнения воздуха в г. Бишкек.

Ключевые слова: концентрация твердых частиц PM_{2.5}, метеопараметры, коэффициент корреляции, автокорреляционная функция, кросс-корреляционная функция.

Введение. Методы машинного обучения являются наиболее распространенными методами прогнозирования качества воздуха. Как отмечено в обзоре публикаций [1], для повышения точности прогнозирования качества воздуха на основе методов машинного обучения очень часто используются метеорологические факторы – около 40% статей на эту тему в той или иной степени содержат анализ взаимосвязей метеофакторов и загрязнения воздуха. Так, например, в [2] представлена статистическая сводка сезонного загрязнения PM₁₀ и метеорологических условий в районе Бруней-Муара (Юго-Восточная Азия) с 2009 по 2019 год. Выявлены положительные или отрицательные, умеренные ($0,30 < r < 0,49$) и слабые ($r < 0,29$) коэффициенты корреляции Пирсона r между концентрациями PM₁₀ и температурой, скоростью ветра и количеством осадков для разных сезонов муссонов. Также в [2] исследован lag-effect, то есть эффект задержки, когда в прогностические модели добавляется концентрация PM₁₀ предыдущего дня PM_{10(t-1)}. В [3] на основе данных для двух различных городских районов Шри-Ланки с 1 января 2019 г. по 31 мая 2021 г. исследованы корреляции метеопараметров (включая температуру окружающей среды, относительную влажность, солнечную радиацию, осадки, скорость ветра, направление ветра) и концентраций PM_{2.5} и PM₁₀, при этом более высокие коэффициенты корреляции выявлены для относительной влажности и температуры. Полученная информация применена при разработке моделей прогнозирования качества воздуха. В [4] показана взаимосвязь между концентрациями PM_{2.5} и метеопараметрами (скорость ветра, относительная влажность, точка росы, температура воздуха, атмосферное давление) для различных регионов Индии на выборке наблюдений с ноября 2019 г. по апрель 2020 г., а также показано, что полученные на основе методов машинного обучения регрессионные прогнозные модели как функции от одного из метеопараметров дают наилучшую оценку по R -квадрат для температуры ($R^2 < 0.38$). Матрица коэффициентов ранговой корреляции Спирмена между переменными – метеопараметрами (температура воздуха, относительная влажность, количество осадков, скорость и направление ветра) и концентрациями PM_{2.5} в атмосферном воздухе Исфахана (Иран) получена на основе данных за 2011–2019 годы и представлена в [5]. Авторы отмечают, что метеопараметры имеют высокую корреляцию и выбраны подходящими для использования в различных прогнозных моделях.

Обзор этих и других статей показывает, что корреляции между метеопараметрами и концентрациями твердых частиц в атмосферном воздухе зависят от геолокации места, для которого составляется прогноз, и обусловлены его различными географическими и климатическими особенностями. Наиболее полным на настоящий момент исследованием

качества воздуха в г. Бишкеке является [6], в котором, в частности, представлены результаты корреляционного анализа концентрации PM_{2.5} и метеорологических параметров: скорости и направления ветра, температуры и относительной влажности на основе данных Гидрометеоцентра КР за период 2015 – 2020 гг. Показаны умеренная отрицательная корреляция PM_{2.5} со скоростью ветра ($r = -0.52$), умеренная отрицательная корреляция с температурой ($r = -0.63$), умеренная положительная корреляция с относительной влажностью ($r = 0.3$) и практическое отсутствие корреляции с направлением ветра. В [7] на основе регрессионного анализа также исследованы взаимосвязи между загрязненностью атмосферного воздуха г. Бишкек и сопутствующими ей климатическими условиями в различные периоды года на основе данных о загрязнении [8] и за период февраль – ноябрь 2019 г. Выявлены положительные и отрицательные корреляции концентраций загрязнения воздуха частицами PM_{2.5} и метеорологических данных, таких как скорость ветра, температура воздуха, относительная влажность воздуха, температура точки росы, интенсивность осадков и атмосферное давление. С учетом этого исследования были разработаны различные модели прогноза уровня загрязненности воздуха на основе методов машинного обучения и искусственных нейронных сетей [9, 10].

Однако во всех указанных работах рассчитывались коэффициенты корреляций пар значений метеопараметры/концентрация твердых частиц в текущий i -тый момент измерений. Учитывая инерционность процессов в атмосфере, очевидна необходимость исследования корреляций концентраций PM_{2.5} с метеопараметрами, наблюдаемыми в предшествующие моменты времени, то есть с учетом задержки во времени влияния метеофакторов на концентрации PM_{2.5} (так называемый lag-эффект). Кроме того, к настоящему времени накоплена выборка наблюдений, достаточная для более полного анализа взаимосвязей указанных метеопараметров и уровней загрязненности воздуха г. Бишкек.

Таким образом, целью настоящей статьи является анализ взаимных корреляций метеофакторов и концентраций PM_{2.5} с учетом lag-эффекта с точки зрения применения их в качестве предикторов в моделях машинного обучения для решения задач прогноза загрязнения атмосферного воздуха г. Бишкек. Такой анализ необходим для уяснения процессов загрязнения атмосферного воздуха, а также для построения более точных, по сравнению с имеющимися моделями прогноза его состояния на основе методов машинного обучения с целью потенциального влияния на управление качеством воздуха.

Данные загрязнения атмосферного воздуха и метеопараметров г. Бишкек.

В исследовании использованы данные о загрязнении атмосферного воздуха г. Бишкек, размещенные на сайте [8]. Данные включают индекс качества воздуха AQI и концентрацию в воздухе твердых частиц PM_{2.5} (mkg/m^3) начиная с 06.02.2019 г. по настоящее время (период измерения – 1 час). На рисунке 1 представлены временные ряды изменения содержания PM_{2.5} в атмосферном воздухе г. Бишкек за период с 09.02.2019 г. по 14.09.2023 г. с интервалом в 3 часа. На нем так же, как и в предыдущих исследованиях [9, 10], «отмечается явная сезонная составляющая, связанная с началом/концом отопительных сезонов в городе: значения PM_{2.5} в холодные (зимние) периоды времени достаточно резко возрастают и зачастую значительно превышают допустимую норму. Это связано с увеличением загрязняющих атмосферу выбросов городской ТЭЦ и котельных города, производственные мощности которых обусловлены началом и концом отопительных периодов, печей частного сектора, а также – с существованием длительных неблагоприятных метеорологических условий, которым свойственны температурные инверсии, слабые ветры, туманы».

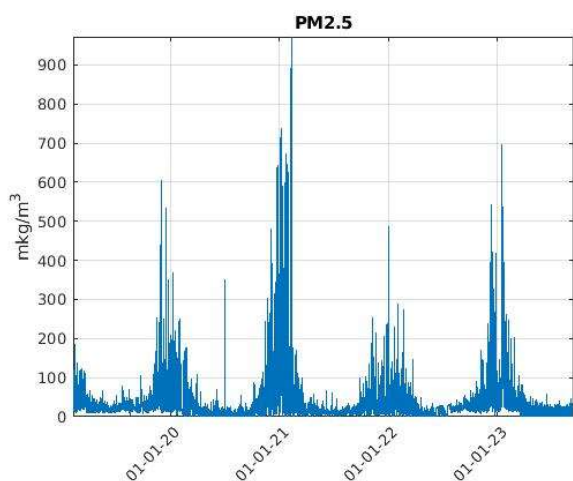


Рисунок 1 – Значения концентраций PM2.5 в воздухе, г. Бишкек, за период 09.02.2019 – 14.09.2023

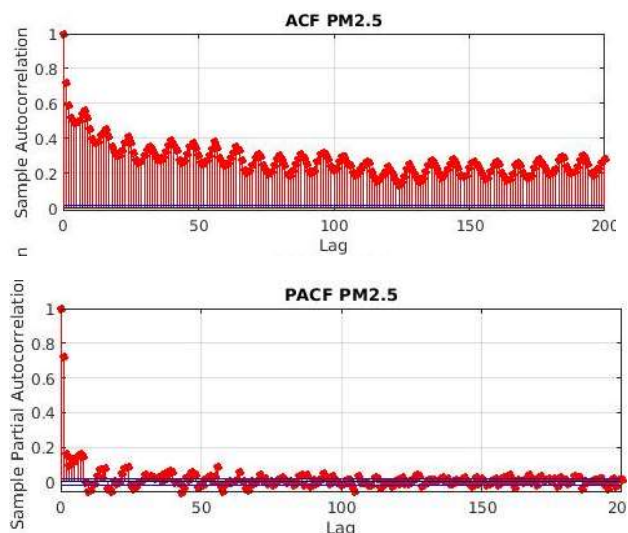


Рисунок 2 – Автокорреляционная и частичная автокорреляционная функции ВР PM2.5

Полученные автокорреляционная (ACF) и частичная автокорреляционная функции (PACF) PM2.5 (рис. 2), так же, как и в [9, 10], «указывают на нестационарность представленных временных рядов и на их периодичность в 24 часа, что обуславливается повторением суточной истории в процессах загрязнения: в утренние часы, как правило, уровень загрязнения ниже, чем в вечерние, что в основном объясняется физико-географическими и климатическими условиями города».

В таблице 1 представлены статистические характеристики временных рядов PM2.5 за периоды, соответствующие началу и концу отопительных сезонов в городе: среднее (математическое ожидание) $mean$ и стандартное (среднеквадратическое) отклонение σ .

Таблица 1 – Средние значения и стандартные отклонения концентраций PM2.5

Период наблюдений	PM2.5	
	$mean$ mkg/m ³	σ mkg/m ³
09.02.2019-23.03.2019	44.0	23.8
24.03.2019-31.10.2019	22.3	10.4
01.11.2019-31.03.2020	40.7	122.0
01.04.2020-09.10.2020	6.9	8.4
10.10.2020-31.03.2021	76.1	115.2
01.04.2021-07.10.2021	12.7	9.7
08.10.2021-03.04.2022	39.2	40.5
04.04.2022-25.10.2022	12.4	10.4
26.10.2022-10.03.2023	80.3	99.1
11.03.2023-14.09.2023	13.5	13.4

Характеристики PM2.5 неотопительных летних периодов 2021, 2022 и 2023 годов очень близкие, чего нельзя сказать о соответствующих периодах 2019 и 2020 годов. Стоит отметить, что средние значения зимних (отопительных) периодов 2019, 2019 – 2020, 2021–2022 годов приблизительно одинаковые, однако среднеквадратические отклонения в эти периоды сильно отличаются. Средние значения концентрации PM2.5 в зимние периоды 2020 – 2021 и 2022 – 2023 годов почти в 2 раза выше средних значений концентрации PM2.5 в зимние периоды предыдущих лет. Прежде всего это может быть объяснено более низкими в среднем температурами воздуха зимой в 2020–2021гг. и 2022–2023гг. (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Средняя температура воздуха в зимние месяцы 2020–2023 гг.

	2019 – 2020	2020 – 2021	2021 – 2022	2022 – 2023
Ноябрь	1.4	1.0	2.3	5.0
Декабрь	1.1	-4.95	3.3	-3.2
Январь	-1.7	-3.8	1.8	-5.6
Февраль	3.7	3.9	1.5	2.2
Март («зимние» дни)	8.2	6	6.4	10.8
Среднее за отопительный период	2.48	0.17	4.1	0.7

Для исследования влияния метеорологических факторов (скорость ветра, температура воздуха, относительная влажность воздуха, температура точки росы, осадки и атмосферное давление) на уровень загрязнения атмосферного воздуха использованы данные с сервера международного обмена NOAA (США) в формате SYNOP. Данные получены через сайт [11] за период с 09.02.2019 г. по 14.09.2023 г. Поскольку концентрации PM_{2.5} демонстрируют явную сезонность, а также потому, что распределение временных рядов температуры и температуры точки росы бимодальное, была произведена декомпозиция метеоданных в соответствии с их принадлежностью отопительному (зимнему) или неотопительному (летнему) сезонам. Из выборки наблюдений были исключены пары PM_{2.5}/метеофакторы, содержащие пропуски, а также содержащие выбросы. Кроме того, из дальнейшего рассмотрения исключен летний период 01.04.2020 – 09.10.2020 как нетипичный (см. табл. 1), поскольку, как отмечено в [10], «введение карантина и чрезвычайной ситуации весной 2020 года в связи с распространением в мире коронавируса COVID-19 привело к снижению производственной и транспортной нагрузки на экологию крупных городов».

Графики распределений метеопараметров для зимних и летних периодов представлены на рисунках 3-12. На этих рисунках T – температура воздуха в градусах Цельсия (°C), T_d – температура точки росы – температура, при понижении до которой содержащийся в воздухе водяной пар достигнет насыщения в градусах Цельсия (°C), WS – скорость ветра в метрах в секунду (м/с), RH – относительная влажность воздуха в процентах (%), P – атмосферное давление в гектопаскалях (гПа). Информация об осадках в [11] представлена в текстовом виде, описывающем характер осадков и/или состояние неба. Эти данные были обработаны, и введен численный относительный показатель Pr – показатель осадков: 1 – ливень или сильный дождь (снег), 0.75 – дождь (снег) или слабый ливневый дождь, 0.5 – слабый дождь (снег), 0.25 – морось.

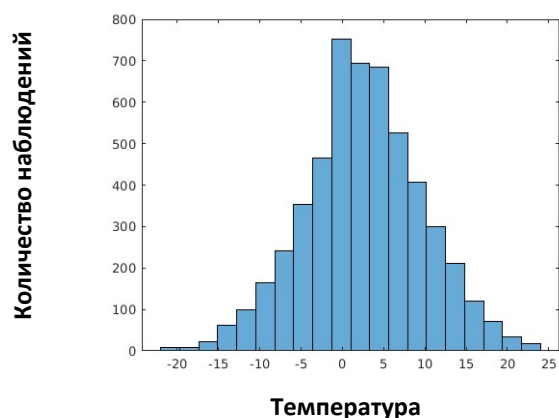


Рисунок 3 – Распределение значений температуры в зимний сезон года

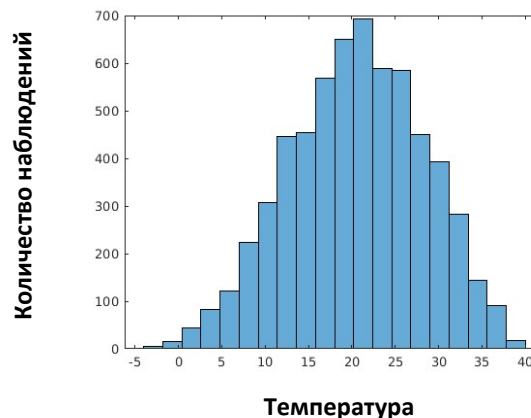
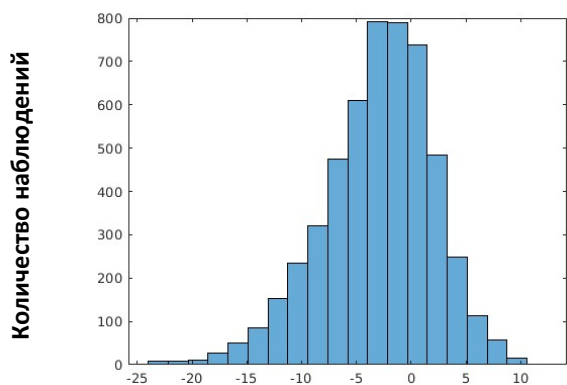
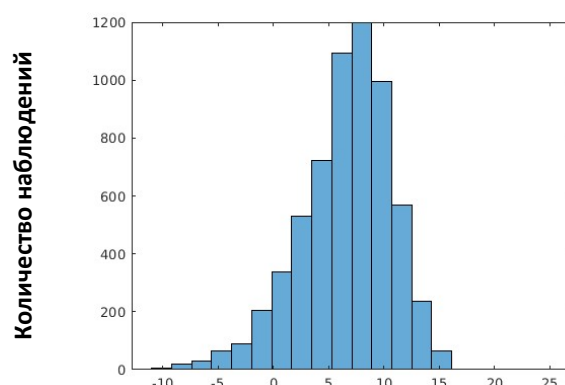


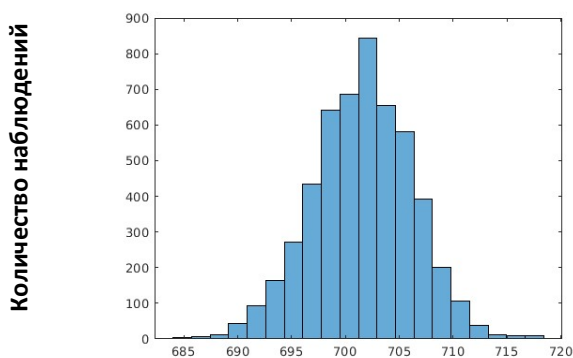
Рисунок 4 – Распределение значений температуры в летний сезон года



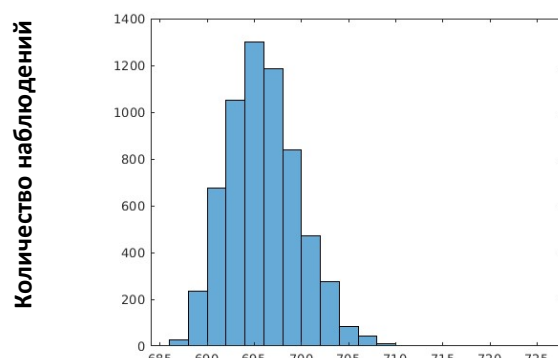
Температура точки росы
 Рисунок 5 – Распределение значений температуры точки росы в зимний сезон года



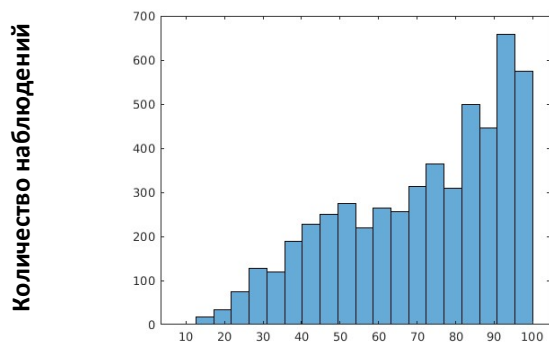
Температура точки росы
 Рисунок 6 – Распределение значений температуры точки росы в летний сезон года



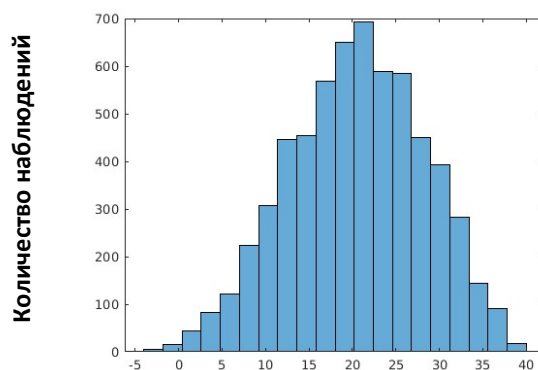
Атмосферное давление
 Рисунок 7 – Распределение значений температуры в зимний сезон года



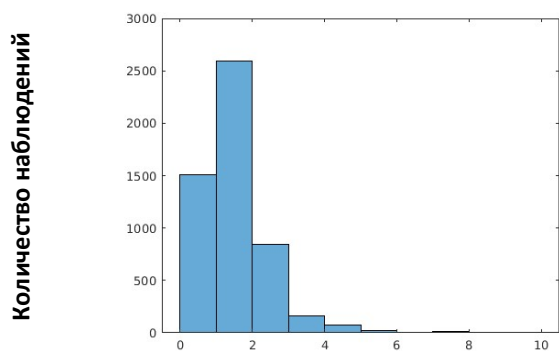
Атмосферное давление
 Рисунок 8 – Распределение значений температуры в летний сезон года



Влажность (в %)
 Рисунок 9 – Распределение относительной влажности воздуха в зимний сезон года

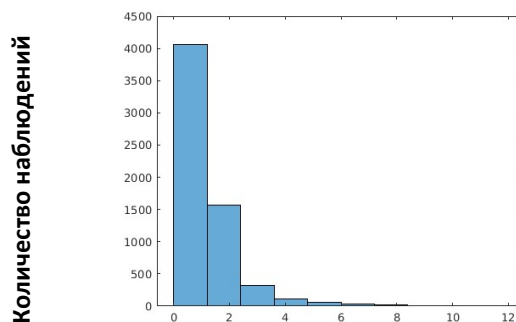


Влажность (в %)
 Рисунок 10 – Распределение относительной влажности воздуха в летний сезон года



Скорость ветра в м/сек

Рисунок 11 – Распределение скорости ветра в зимний сезон года



Скорость ветра в м/сек

Рисунок 12 – Распределение скорости ветра в летний сезон года

Как видно из рисунков 3-12, распределение метеопараметров – нормальное или близко к нормальному.

Анализ влияния метеофакторов на концентрацию значения РМ 2.5. Для выявления особенностей поведения и динамических свойств метеопараметров полезно построение их автокорреляционных функций (АКФ), показывающих степень линейной статистической зависимости между значениями временных рядов в равноотстоящие моменты времени – лаги (рисунки 13-24). На кореллограммах температуры воздуха, температуры точки росы, относительной влажности и скорости ветра отмечается суточная периодичность (8 измерений). Температуру воздуха и температуру точки росы характеризует медленное затухание АКФ, что говорит о высокой инерционности изменения этих параметров, в особенности в летнее время. Давление и относительная влажность в летнее время также достаточно инерционны, чего не наблюдается в зимнее время. Во временных рядах интенсивности осадков доминирует случайная составляющая.

Как было отмечено ранее, в работах [1-7] для исследования зависимости между концентрациями РМ2.5 и метеопараметрами рассчитывались коэффициенты корреляций пар значений концентрация твердых частиц/ метеопараметры в текущий i -тый момент измерений. Однако, учитывая инерционность процессов в атмосфере, очевидна необходимость исследования корреляций концентраций РМ2.5 с метеопараметрами, наблюдаемыми в предшествующие моменты времени, то есть с учетом задержки во времени влияния метеофакторов на концентрации РМ2.5 (так называемый lag-эффект).

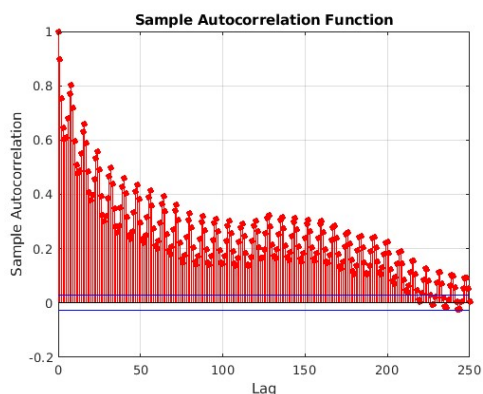


Рисунок 13 – АКФ температуры воздуха для зимнего периода

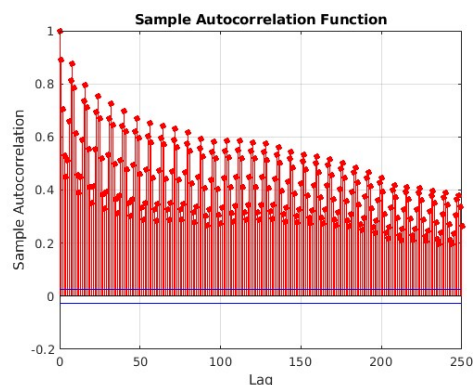


Рисунок 14 – АКФ температуры воздуха для летнего периода

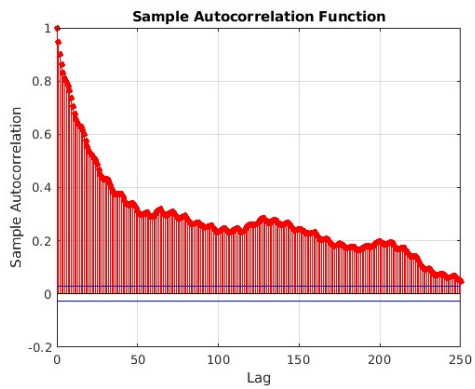


Рисунок 15 – АКФ температуры точки росы для зимнего периода

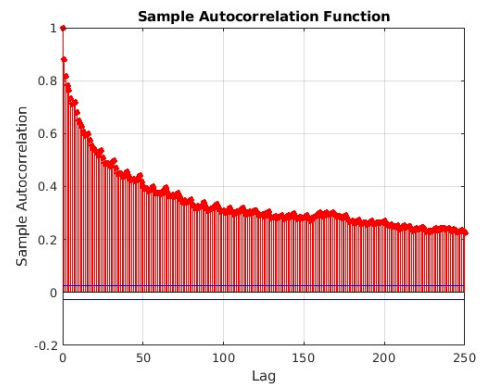


Рисунок 16 – АКФ температуры точки росы для летнего периода

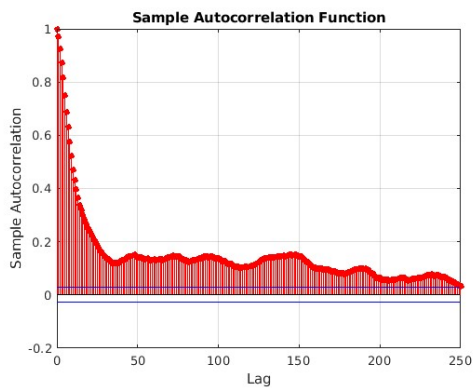


Рисунок 17 – АКФ атмосферного давления для зимнего периода

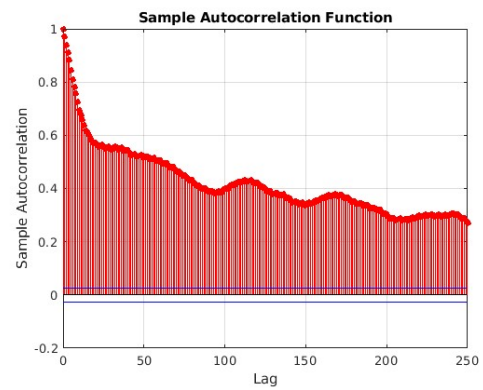


Рисунок 18 – АКФ атмосферного давления для летнего периода

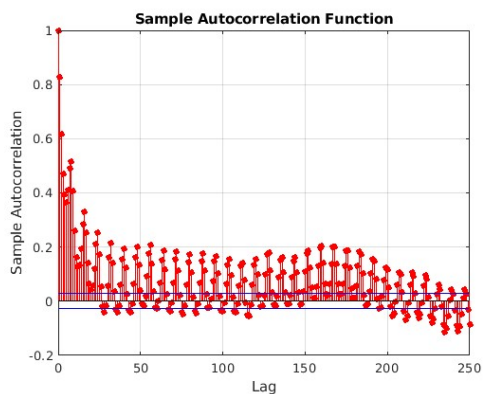


Рисунок 19 – АКФ относительной влажности воздуха для зимнего периода

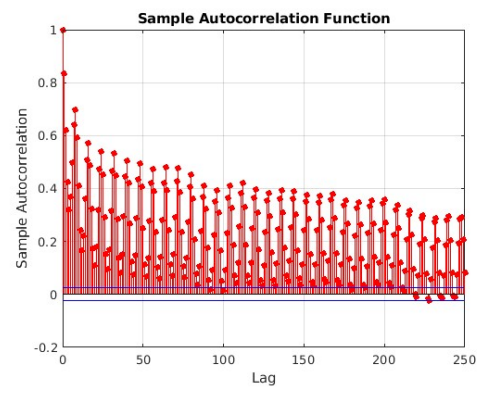


Рисунок 20 – АКФ относительной влажности воздуха для летнего периода

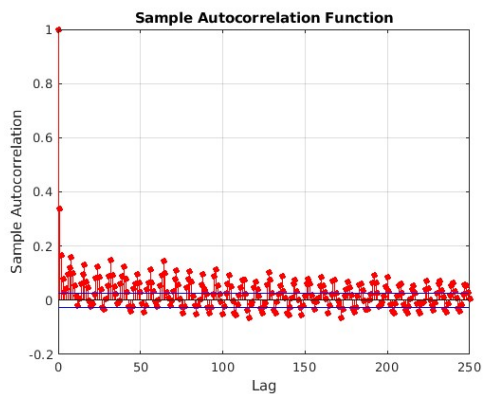


Рисунок 21 – АКФ скорости ветра для зимнего периода

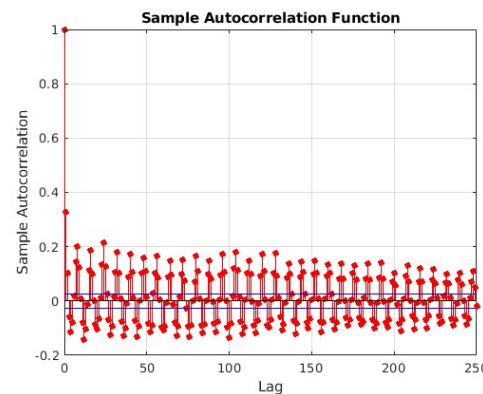


Рисунок 22 – АКФ скорости ветра для летнего периода

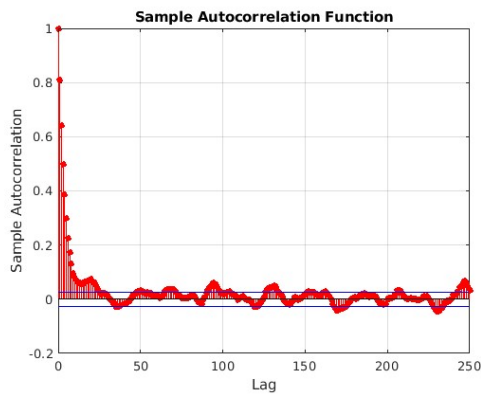


Рисунок 23 – АКФ интенсивности осадков для зимнего периода

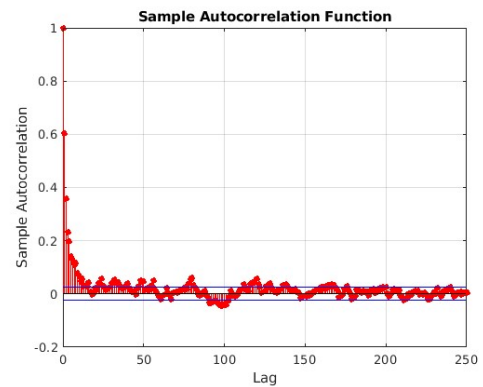


Рисунок 24 – АКФ интенсивности осадков для летнего периода

Один из инструментов оценки степени корреляции двух последовательностей является построение взаимной или кросс-корреляционной функции (ККФ). ККФ определяется для двух временных рядов как коэффициент корреляции между значениями этих временных рядов в зависимости от сдвига во времени между ними [12]. На рисунках (25-27) представлены ККФ для временных рядов концентраций PM2.5 и всех рассматриваемых метеопараметров. Максимум ККФ указывает величину лага, при которой два ряда в наибольшей степени коррелируют. Если пики в ККФ повторяются через определенное время, то взаимное влияние рядов носит периодический характер [12].

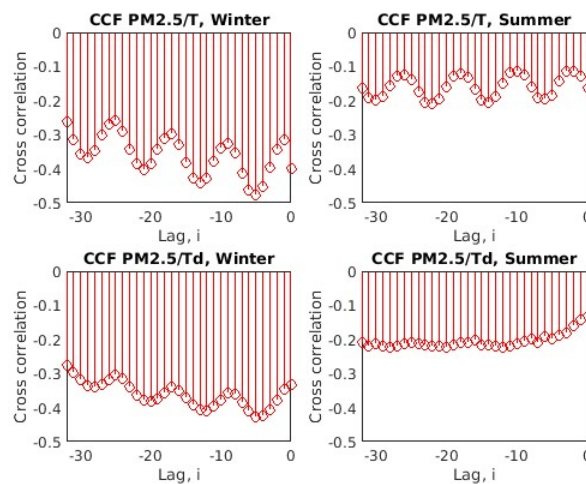


Рисунок 25 – ККФ температуры воздуха (T), температуры точки росы (Td) и концентрации PM2.5 для зимнего и летнего периодов

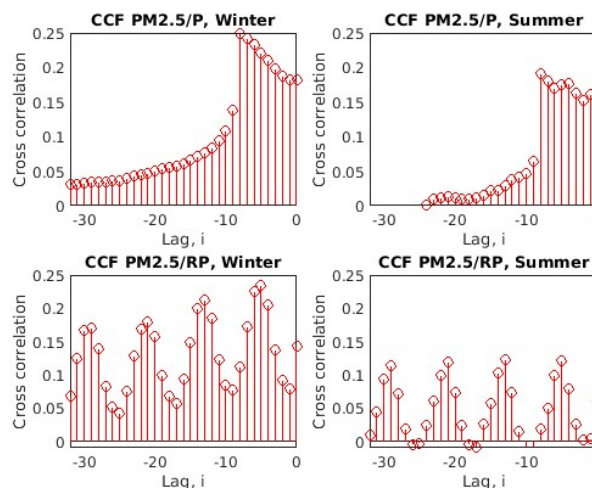


Рисунок 26 – ККФ температуры атмосферного давления (P), относительной влажности воздуха (RP) и концентрации PM2.5 для зимнего и летнего периодов

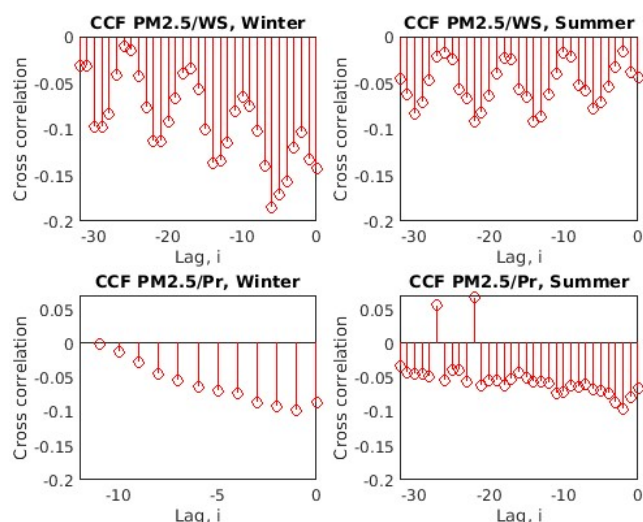


Рисунок 27 – ККФ температуры скорости ветра (WS), интенсивности осадков (Pr) и концентрации $PM_{2.5}$ для зимнего и летнего периодов

В таблице 3 представлены наиболее значимые коэффициенты корреляции метеопараметров и концентрации твердых частиц $PM_{2.5}$ и их лаг для зимнего и летнего периодов времени. Лаги $i-1, i-2, \dots$, соответствуют измерениям на 3, 6 и т.д. часов ранее. Для всех коэффициентов корреляции уровень значимости или P -value < 0.05 , то есть полученные корреляции значимы [12]. Из таблицы 3 следует, что для, например, зимнего периода времени наиболее сильное влияние на концентрацию $PM_{2.5}$, измеренную в i -тый момент времени, оказывает температура воздуха T , наблюдаемая 15 часами ранее (лаг $i-5$), корреляция умеренная (по шкале Чеддока [12]) и отрицательная $r=-0.52$. Такой же лаг определен и для точки росы Td ($r=-0.43$) и относительной влажности RH ($r=0.29$). Корреляция скорости ветра WS – слабая и отрицательная, наиболее выраженная при $i-6$. Наиболее инерционно влияние с умеренным коэффициентом $r=0.32$ атмосферного давления P : лаг = $i-9$. Коэффициент корреляции с интенсивностью осадков Pr отрицателен, но не существен.

Таблица 3 – Наиболее значимые коэффициенты корреляции метеопараметров и концентрации твердых частиц $PM_{2.5}$ и их лаг для зимнего и летнего периодов времени

	$R(PM_{2.5}/T)$	$R(PM_{2.5}/Td)$	$R(PM_{2.5}/P)$	$R(PM_{2.5}/RH)$	$R(PM_{2.5}/WS)$	$R(PM_{2.5}/Pr)$
Для зимнего, отопительного периода						
	-0.5185	-0.4295	0.3204	0.2907	-0.1971	-0.0938
лаг	$i-5$	$i-5$	$i-9$	$i-5$	$i-6$	$i-1$
Для летнего, неотопительного периода						
	-0.1913	-0.2164	0.1909	0.1206	-0.0776	-0.0978
лаг	$i-6$	$i-12$	$i-12$	$i-5$	$i-6$	$i-2$

Выявленные лаги задержки влияния говорят о существенной инерционности процессов загрязненности воздуха как в зимнее, так и в летнее время.

Стоит отметить, что коэффициенты корреляции и вид взаимных корреляционных функций будут зависеть от конкретного периода наблюдений, в особенности для отопительных периодов. Это будет объясняться различными климатическими особенностями того или иного периода, а также характером источников загрязнений, в частности, количеством и видом угля, сжигаемого на городской ТЭЦ. В [10], например, представлены коэффициенты корреляции температуры атмосферного воздуха T , измеренной в сроки $i, i-1, i-2, \dots$, и концентрации $PM_{2.5}$, измеренной в срок i для различных отопительных периодов наблюдений. В таблице 4 эта информация обновлена с учетом новых данных. Логично было ожидать, что самому холодному периоду 2020–2021 гг. (см. Таблицу 2) будет соответствовать самая высокая корреляция с концентрацией $PM_{2.5}$, однако из таблицы это не следует: период 2020–2021 гг. характеризуется значительно меньшими коэффициентами корреляции по сравнению с периодом 2022–2023 гг. Этот факт, скорее всего, указывает на существующие

дополнительные неучтенные факторы, имеющие отношение к источникам загрязнения, в частности, неоднородности типа угля.

Таблица 4 – Коэффициенты корреляции $R(PM_{2.5}/T)$ концентрации $PM_{2.5}$, измеренной в срок I и температуры атмосферного воздуха T , измеренной в сроки $i, i-1, i-2, \dots$, для различных отопительных периодов

Срок измерения	Период наблюдений			
	09.02.19 – 23.03.19 01.11.19 – 31.03.20	26.11.20–31.03.21	08.10.21–03.04.22	26.10.22–10.03.23
	$R (PM_{2.5}/T)$	$R (PM_{2.5}/T)$	$R (PM_{2.5}/T)$	$R (PM_{2.5}/T)$
i	-0.31	-0.29	-0.22	-0.49
$i-1$	-0.25	-0.26	-0.14	-0.48
$i-2$	-0.29	-0.29	-0.24	-0.51
$i-3$	-0.36	-0.36	-0.35	-0.54
$i-4$	-0.45	-0.41	-0.35	-0.58
$i-5$	-0.49	-0.43	-0.36	-0.60
$i-6$	-0.46	-0.40	-0.37	-0.55

Применение полученных результатов в машинном обучении. При построении моделей машинного обучения для решения задач прогноза и классификации уровней загрязнения воздуха необходимо учитывать, что наиболее значимыми факторами являются: температура атмосферного воздуха, температура точки росы, давление, относительная влажность воздуха. То есть эти метеофакторы должны быть в числе обязательных предикторов в прогнозных моделях. При этом важно учитывать исторические данные наблюдений глубиной от одних до нескольких суток назад, поскольку в динамике прогнозируемых процессов большое значение имеет инерционность. При визуальной оценке графиков распределения можно считать, что распределение метеопараметров температуры, температуры точки росы и атмосферного давления близко к нормальному в рамках одного сезона. Это позволит применить Z -норму для нормализации данных при формировании соответствующих входных векторов модели машинного обучения. Для относительной влажности, которая принимает значения от 0 до 100 % (от 0 до 1 – в относительных единицах), нормализации не требуется. Скорость ветра и интенсивность осадков принимает всего несколько дискретных значений, нормализовать их не имеет смысла.

Заключение. Таким образом, из результатов анализа таблицы 3 и графиков 15-27 следует, что существуют слабые и умеренные корреляции (как отрицательные, так и положительные) между концентрациями $PM_{2.5}$ и метеорологическими параметрами, измеренными в текущий и прошлые сроки, при этом в летний период корреляции менее выраженные. Наилучшие взаимосвязи для летнего периода обнаружены между концентрациями $PM_{2.5}$ и температурой воздуха T в предшествующий срок измерений $i-6$ ($r = -0.19$), температурой точки росы Td в срок измерений $i-12$ ($r = -0.22$), давлением в срок измерений $i-12$ ($r = 0.19$), влажностью RH в срок измерений $i-5$ ($r = 0.12$). Существуют слабые отрицательные корреляции со скоростью ветра WS в срок $i-6$ и с интенсивностью осадков Pr в срок $i-2$. Для зимних периодов времени характерна большая инерционность процессов и более выраженные корреляции. Наилучшие взаимосвязи обнаружены между концентрациями $PM_{2.5}$ и температурой в предшествующий срок измерений $i-5$ ($r = -0.52$), температурой точки росы Td в срок измерений $i-5$ ($r = -0.43$), давлением в срок измерения $i-9$ ($r = 0.32$), относительной влажностью в срок измерений $i-5$ ($r = 0.29$), скоростью ветра в срок измерений $i-6$ ($r = -0.20$). Корреляция между концентрациями $PM_{2.5}$ и интенсивностью осадков Pr в срок измерений $i-1$ – отрицательная, но несущественная ($r = -0.09$).

Полученные качественные результаты не противоречат результатам, представленным в [6]. Количественные оценки корреляций концентрации $PM_{2.5}$ с температурой атмосферного воздуха и относительной влажностью близки, однако разнятся с оценкой корреляции со скоростью ветра.

Представленную в работе информацию можно использовать при анализе процессов загрязнения городского атмосферного воздуха, а также при построении моделей машинного обучения для прогноза концентраций PM_{2.5} и индекса качества воздуха AQI, учитывающих метеорологические факторы.

Литература

1. Manuel Méndez, Mercedes G. Merayo, Manuel Núñez. Machine learning algorithms to forecast air quality: a survey // Artificial Intelligence Review (2023) 56:10031–10066. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10424-4>
2. Wan Yun Hong Meteorological variability and predictive forecasting of atmospheric particulate pollution // Scientific Reports 14, Article number: 14 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41906-8?>
3. Mampitiya, L.; Rathnayake, N.; Leon, L.P.; Mandala, V.; Azamathulla, H.M.; Shelton, S.; Hoshino, Y.; Rathnayake, U. Machine Learning Techniques to Predict the Air Quality Using Meteorological Data in Two Urban Areas in Sri Lanka. *Environments* 2023, 10, 141.
4. Mr. V. Devasekhar 1, Dr. P. Natarajan2. Prediction of Air Quality and Pollution using Statistical Methods and Machine Learning Techniques // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. Vol. 14, No. 4, 2023
5. Farzaneh Mohammadi , Hakimeh Teiri , Yaghoub Hajizadeh , Ali Abdollahnejad, Afshin Ebrahimi. Prediction of atmospheric PM_{2.5} level by machine learning techniques in Isfahan, Iran // Scientific Reports (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52617-z>
6. ПРООН и ЮНЕП (2022). Качество воздуха в Бишкеке: Оценка источников выбросов и дорожная карта для содействия управлению качеством воздуха. Бишкек и Найроби // URL:https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2022-10/Качество%20воздуха%20в%20Бишкеке_RU%203.pdf
7. Лыченко, Н. М. Регрессионный анализ метеорологических факторов и концентраций частиц PM_{2.5} в атмосферном воздухе г.Бишкек / Н. М. Лыченко // Проблемы автоматизации и управления. – 2019. – № 2(37). – С. 5-15. – DOI 10.5281/zenodo.3594649. – EDN QGNVJK.
8. AirNow Department of State // https://airnow.gov/index.cfm?action=airnow.global_summary#U.S._Department_of_State_Bishkek, (дата обращения: 05.10.2022).
9. Великанова, Л. И. Мультирегрессионные и обобщенно-регрессионные нейросетевые модели краткосрочного прогноза загрязнения PM_{2.5} в г. Бишкек с учетом метеорологических параметров / Л. И. Великанова, Н. М. Лыченко // Проблемы автоматизации и управления. – 2019. – № 2(37). – С. 16-25. – DOI 10.5281/zenodo.3594777. – EDN MNNDYU.
10. Лыченко, Н. М. Модификация классификатора индекса качества воздуха Г. Бишкек с учетом фактора загрязнения / Н. М. Лыченко, А. В. Сороковая // Проблемы автоматизации и управления. – 2021. – № 3(42). – С. 101-110. – EDN VXWCYS.
11. Сайт «Расписание погоды rp5.ru» Архив погоды в Бишкеке https://rp5.ru/%D0%90%D1%80%D1%85%D0%B8%D0%B2_%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D1%8B_%D0%B2_%D0%91%D0%B8%D1%88%D0%BA%D0%B5%D0%BA%D0%B5 (дата обращения: 05.10.2022)
12. Современное прогнозирование. URL: <https://forecasting.svetunkov.ru/etextbook/> (дата обращения: 30.09.2023).