

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ PM_{2.5} НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ТИПА SPS30**А.М. Хақдодов**

Филиал Национального исследовательского технологического университета МИСИС в городе Душанбе

В статье приведены результаты экспериментальных измерений концентрации PM_{2.5} на основе применения оптического датчика типа SPS30. Выявлено наличие зависимости между концентрацией PM_{2.5} и метеорологическими условиями, стабильно низкие концентрации PM_{2.5} в горно-долинной территории, что свидетельствует о низкой антропогенной нагрузке и эффективных механизмах естественного самоочищения атмосферы, которые обусловлены особенностями циркуляции воздуха рассматриваемой территории. Анализ концентрации PM_{2.5} до и после пылевого вторжения показал, что внешний перенос пылевых масс выступает доминирующим фактором формирования качества воздуха, что выражается резким нарушением обычного режима, который проявляется в экстремальном росте загрязнения.

Ключевые слова: качество воздуха, предельно-допустимые концентрации, PM_{2.5}, оптический датчик, пылевое вторжение.

ЧЕНКУНИИ ТАҶРИБАВИИ КОНЦЕНТРАТСИЯИ PM_{2.5} ДАР АСОСИ ИСТИФОДАИ ДАТЧИКИ ОПТИКИИ НАМУДИ SPS30**А.М. Ҳақдодов**

Дар мақола натиҷаҳои ченкунии таҷрибаии консентратсияи PM_{2.5} дар асоси истифодаи датчики оптикӣ намуди SPS30 оварда шудаанд. Вобастагии байни консентратсияи PM_{2.5} ва шароити метеорологӣ муайян карда шуд. Паст будани устувори консентратсияи PM_{2.5} дар ҳудуди кӯҳӣ-водигӣ аз сатҳи пасти таъсири антропогенӣ ва самаранокии механизмҳои табиӣ худтозакунии атмосфера шаҳодат медиҳад, ки бо хусусиятҳои гардиши ҳаво дар минтақаи мавриди таҳқиқ вобаста мебошад. Таҳлили консентратсияи PM_{2.5} пеш аз воридшавии чанг ва баъд аз он нишон дод, ки интиқоли берунии массаҳои чангу ғубор ҳамчун омилҳои асосии ташаккули сифати ҳаво баромад мекунад. Ин ҳолат бо вайроншавии ногаҳонии режими муқаррарии атмосфера ва афзоиши шадиди сатҳи ифлосшавӣ ифода меёбад.

Калидвожаҳо: сифати ҳаво, консентратсияҳои ҳадди иҷозатдодашуда, PM_{2.5}, датчики оптикӣ, воридшавии чанг.

EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF PM_{2.5} CONCENTRATION BASED ON THE APPLICATION OF AN SPS30-TYPE OPTICAL SENSOR**A.M. Hakdodov**

The article presents the results of experimental measurements of PM_{2.5} concentration based on the application of an SPS30-type optical sensor. A relationship between PM_{2.5} concentration and meteorological conditions was identified. The consistently low concentrations of PM_{2.5} in the mountain-valley area indicate a low anthropogenic load and the presence of effective mechanisms of natural atmospheric self-purification, which are determined by the specific features of air circulation in the studied territory. The analysis of PM_{2.5} concentration before and after a dust intrusion showed that the external transport of dust masses acts as the dominant factor in the formation of air quality, resulting in a sharp disruption of the usual atmospheric regime and an extreme increase in pollution levels.

Keywords: air quality, maximum permissible concentrations, PM_{2.5}, optical sensor, dust intrusion.

Введение

Проблема загрязнения атмосферного воздуха признана Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) одной из самых серьезных экологических угроз. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу становятся причиной развития заболеваний сердечно-сосудистой, дыхательной, эндокринной систем, аллергических реакций, онкопатологии и др. Особая уязвимость детского население и лиц с хроническими заболеваниями к негативному воздействию загрязнителей атмосферного воздуха ставит важнейшей задачей контроль за качеством атмосферного воздуха как на государственном, так и общемировом уровнях.

С целью нормирования содержания загрязняющих веществ проводится определение значений максимально-разовых (ПДК_{м.р.}), среднесуточных (ПДК_{с.с.}) и среднегодовых (ПДК_{с.г.}) концентраций. На практике каждое государство самостоятельно устанавливает ПДК аэрополлютантов, однако Глобальные рекомендации по качеству воздуха, разработанные ВОЗ, применимы в любой из стран мира, так как данные, касающиеся твердых частиц (PM_{2.5} и PM₁₀), озона, двуокиси азота, двуокиси серы и окиси углерода, получены на основе экспертных оценок актуальных данных об их влиянии на здоровье человека. Нормативы, установленные ВОЗ [1], являются рекомендательными, тогда как национальные стандарты носят обязательный характер. Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ атмосферного воздуха приведены в таблице 1.1

Таблица 1 – Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ атмосферного воздуха (мкг/м³)

Страна / система	PM _{2.5} (год/сут)	PM ₁₀ (год/сут)	NO ₂ (год/сут/1ч)	SO ₂ (сут/1ч)	O ₃ (8 ч/1ч)	CO (8 ч), мг/м³
ВОЗ	5 / 15	15 / 45	10 / 25 / 200	40 / 500	100 / –	10
США	9 / 35	– / 150	53 / – / 188	– / 196	140 / –	10
ЕС	25 / –	40 / 50	40 / – / 200	125 / 350	120 / –	10

Примечания: Все значения приведены в мкг/м³, за исключением CO (мг/м³). Обозначения: год - среднегодовая концентрация, сут - среднесуточная, 1 ч - максимальная разовая (часовая), 8 ч - скользящее среднее за 8 часов, значения для США переведены из ppт/ppb в мкг/м³ (при стандартных условиях).

Источник: Составлено на основе международных и национальных нормативных документов: рекомендаций Всемирной организации здравоохранения (WHO Air Quality Guidelines, 2021), стандартов США (EPA NAAQS) [2], директив Европейского союза (EU Air Quality Directive) [3].

Опыт зарубежных стран показывает, что для определения концентрации взвешенных частиц используют датчики, работающие на основе метода рассеяния света [4], т.к. они относительно дешевы в производстве, имеют низкое энергопотребление и быстрое время отклика [5], благодаря чему представляется возможным проводить мониторинг с более высоким пространственно-временным разрешением [6]. Возможность передачи полученных данных по беспроводным каналам связи посредством Wi-Fi, Bluetooth и др. на вычислительные устройства и мобильные приложения, которые выполняют обработку сигналов и их цифровое преобразование в режиме реального времени, создает предпосылки для формирования распределенных сетей мониторинга качества атмосферного воздуха [7– 9].

В зависимости от размера частиц описанная методика имеет некоторые ограничения. Так, например, для частиц диаметром более 0,3 мкм количество рассеянного света примерно пропорционально их массовой/численной концентрации, однако частицы диаметром менее 0,3 мкм не рассеивают достаточно света и не могут быть обнаружены этим методом [10, 11]. Для разделения обнаруживаемых частиц диаметром более 0,3 мкм используется алгоритм, основанный на сигнале, полученном от рассеянного света [12], либо прикрепляется импактор/фильтр на входе [13].

Материалы и методы исследования

В рамках проведения экспериментальных исследований по мониторингу качества атмосферного воздуха в городской среде особое значение имеет выбор измерительного оборудования, который обеспечивает достаточную точность, стабильность и воспроизводимость результатов измерений. Для реализации задач исследования использован оптический датчик твердых аэрозольных частиц SPS30 производства компании Sensirion, который предназначен для непрерывного контроля концентрации взвешенных частиц в атмосферном воздухе. Данный сенсор относится к современному поколению цифровых PM-датчиков и широко применяется в системах экологического мониторинга, интеллектуальных IoT-платформах и в устройствах контроля качества воздуха внутри помещений и в городской среде. Компактность размера датчика (рисунок 1.1) позволяет интегрировать его в мобильные измерительные платформы, переносные станции мониторинга и беспилотные системы экологического наблюдения [14].

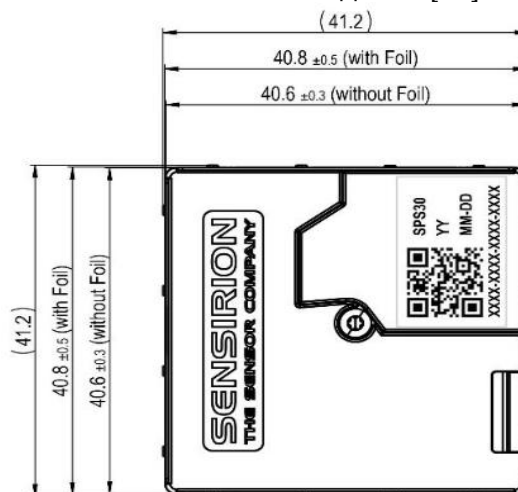


Рисунок 1 – Габаритные размеры оптического датчика SPS30

Датчик SPS30 работает на основе принципа лазерного рассеяния (рисунок 1.2). Так, через измерительную камеру датчика с помощью встроенного вентилятора прокачивается исследуемый воздушный поток. При пересечении лазерного луча частицами аэрозоля, которые содержатся в воздухе, каждая частица рассеивает свет лазера. По спецификации лазер имеет длину волны $\lambda \approx 660$ nm, что соответствует красной области спектра. Рассеянный свет регистрируется фотодиодным приемником и по интенсивности и форме сигнала определяется размер и количество частиц. Использование данного принципа обеспечивает возможность получения оперативных измерений в режиме реального времени с высокой чувствительностью к мелкодисперсным загрязнителям, включая частицы PM1.0, PM2.5, PM4 и PM10.

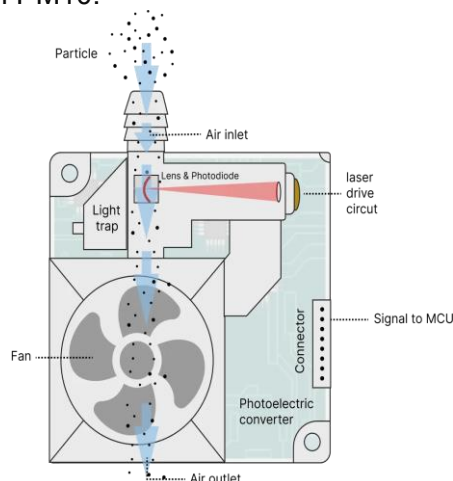


Рисунок 2 – Оптический датчик типа SPS30 (схема работы)

Долговременная работа датчика обеспечивается наличием фирменной технологии защиты от загрязнения оптической системы, которая увеличивает срок эксплуатации датчика при непрерывной работе на 10 лет, что является необходимым при организации долговременных наблюдений в системе экологического мониторинга. Измеряемый диапазон концентраций аэрозольных частиц датчика SPS30 находится в пределах от 0 до 1000 мкг/м³. Согласно спецификации для диапазона концентраций [0–100мкг/м³], погрешность измерения для PM2.5 составляет ± 5 мкг/м³ + 5 % измеренного значения и ± 10 % при концентрациях [100 –1000 мкг/м³]. Детальный анализ аэрозольного состава воздуха возможен за счет технических характеристик датчика SPS30, который способен определять и численную концентрацию частиц в диапазоне от 0 до 3000 частиц/см³. В таблице 1.1 обобщены технические характеристики рассматриваемого датчика.

Таблица 2 - Характеристики датчика SPS30

Параметр	Значение
Диапазон измерения PM	0-1000 мкг/м ³
Поддерживаемые фракции	PM1.0, PM2.5, PM4, PM10
Интервал обновления данных	1 с
Напряжение питания	5 В
Потребляемый ток	45-65 мА
Интерфейсы подключения	UART, I2C
Рабочая температура	от -10 до +60 °C
Рабочая влажность	0-95 %
Размеры	41 × 41 × 12 мм
Масса	26 г
Расчетный срок службы	более 10 лет

В рамках экспериментальной системы мониторинга использовался интерфейс UART, который обеспечивает более устойчивую передачу данных при использовании кабельных соединений увеличенной длины и повышенной электромагнитной помехозащищенности. Скорость передачи данных составляет 115200 бит/с. В процессе эксплуатации внутри измерительной камеры может происходить накопление пылевых частиц, которые влияют на точность измерений. Для минимизации данного эффекта в датчике типа SPS30 реализован механизм автоматической продувки, при котором вентилятор периодически переходит в режим максимальных оборотов для удаления накопившейся пыли. По умолчанию процедура очистки выполняется один раз в неделю, однако интервал может быть изменен программно.

В системе предусмотрен регистр состояния устройства, который позволяет контролировать корректность работы лазерного модуля, скорость вращения вентилятора и наличие аппаратных неисправностей, что обеспечивает повышение надежности системы экологического мониторинга и позволяет своевременно выявлять возможные сбои оборудования.

Датчики подобного типа относятся к категории малогабаритных сенсоров и не заменяют полнофункциональные государственные станции мониторинга атмосферного воздуха, но их применение является экономически эффективным решением при построении распределенных сетей экологического мониторинга городской среды в условиях ограниченного финансирования и необходимости организации большого числа точек наблюдения. Использование датчика SPS30 позволило обеспечить непрерывный сбор данных о концентрации мелкодисперсных аэрозольных частиц в атмосфере города Душанбе, сформировать экспериментальную базу данных для последующего анализа и прогнозирования качества атмосферного воздуха.

Результаты работы и их обсуждение

Так, на графике, представленном на рисунке 1.3, приведены экспериментальные данные концентрации твердых частиц PM2.5.

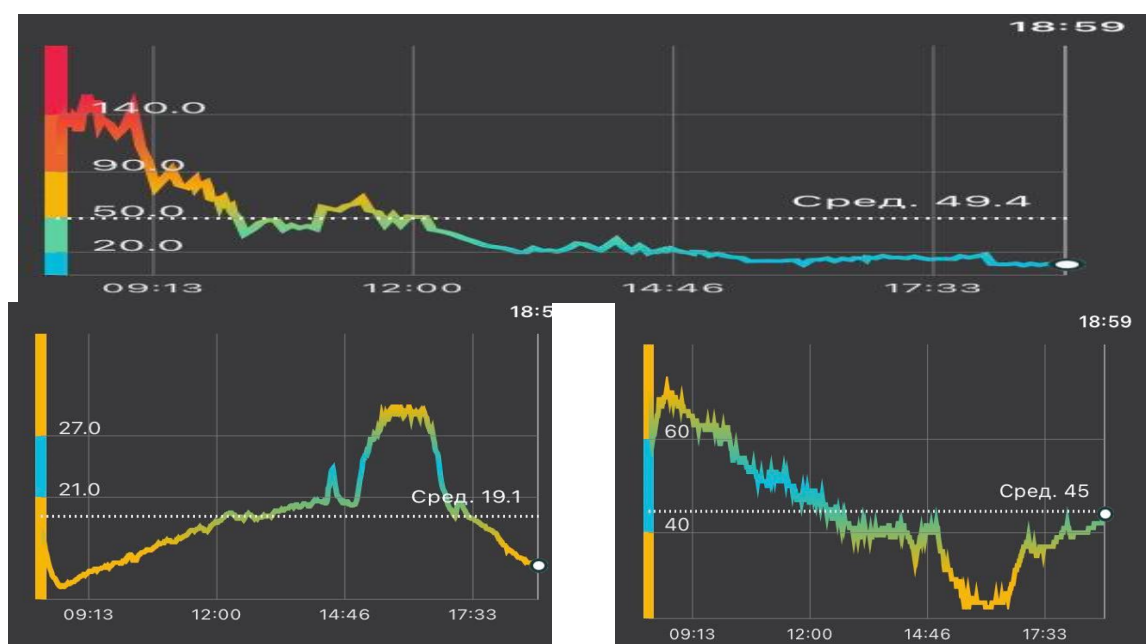


Рисунок 3 – Результаты измерений концентрации PM2.5, $\mu\text{g}/\text{m}^3$

При анализе выше представленного графика была выявлена тенденция снижения уровня загрязнения в течение первой половины дня, который выражается тем, что к полудню концентрация PM2.5 снизилась до уровня 30 – 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ с 120 – 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Вторая половина дня характеризуется стабилизацией значений концентрации PM2.5 на уровне 15 – 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, что указывает на улучшение качества воздуха. При локальном улучшении качества воздуха все еще сохраняется превышение нормативов ВОЗ. Так, среднее значение за рассматриваемый период составляет 49,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Усиление турбулентного перемешивания воздуха способствовало уменьшению агрегации частиц и их осаждения.

Наблюдаемый рост температуры сопровождается усилением конвективных потоков, что приводит к интенсивному рассеиванию загрязняющих веществ.

Совокупный анализ выделенных параметров указывает на наличие зависимости между концентрацией PM_{2.5} и метеорологическими условиями. Так, высокая концентрация PM_{2.5} в утренние часы связана с низкой температурой, высокой влажностью, слабым перемешиванием воздуха и локальными источниками выбросов. Прогрев атмосферы усиливает вертикальные воздушные потоки, что напрямую влияет на дисперсию и снижение концентраций PM_{2.5}. Полученные результаты могут быть использованы при построении прогностических моделей качества атмосферного воздуха, где температура и влажность выступают в качестве значимых предикторов.

Представленные результаты мониторинга качества атмосферного воздуха в воздушном бассейне реки Варзоб (рисунок 1.4) демонстрируют иную картину по сравнению с предыдущим экспериментом, что позволяет более глубоко проанализировать влияние природных условий на формирование концентраций загрязняющих веществ.



Рисунок 4 – Результаты мониторинга качества воздуха воздушного бассейна реки Варзоб, мкг/м³

Анализ графика концентрации PM_{2.5} показывает, что в целом уровень загрязнения находится на относительно низком уровне. Среднее значение составляет около 8,8 мкг/м³, что близко к рекомендованным значениям Всемирной организации здравоохранения и существенно ниже, чем в условиях городской среды. Сопоставительный анализ показывает, что в условиях воздушного бассейна реки Варзоб концентрация PM_{2.5} в значительно меньшей степени зависит от метеорологических факторов, чем в городской среде. Несмотря на заметные колебания влажности и температуры, уровень загрязнения остается стабильно низким, что свидетельствует о низкой антропогенной нагрузке и эффективных механизмах естественного самоочищения атмосферы, которые обусловлены особенностями горно-долинной циркуляции воздуха.

Кратковременные пики концентрации PM_{2.5} не оказывают существенного влияния на общий уровень загрязнения и носят случайный характер. В целом полученные результаты подтверждают, что рассматриваемая территория характеризуется благоприятным экологическим состоянием атмосферы. Проведенный эксперимент позволяет сделать вывод о том, что в природных условиях (вне плотной городской застройки) формируется устойчивый низкий уровень концентрации мелкодисперсных частиц, а влияние метеорологических факторов проявляется преимущественно в виде кратковременных флуктуаций, не приводящих к накоплению загрязняющих веществ. Результаты данного эксперимента могут быть использованы в качестве эталонных при сравнительном анализе с урбанизированными территориями и при разработке моделей пространственного распределения загрязнений.

До пылевого вторжения был проведен эксперимент по измерению концентрации $PM_{2.5}$, что позволяет зафиксировать исходное, фоновое состояние атмосферного воздуха и выявить характерные закономерности суточной динамики загрязнения при отсутствии экстремальных внешних воздействий (рисунок 1.5).

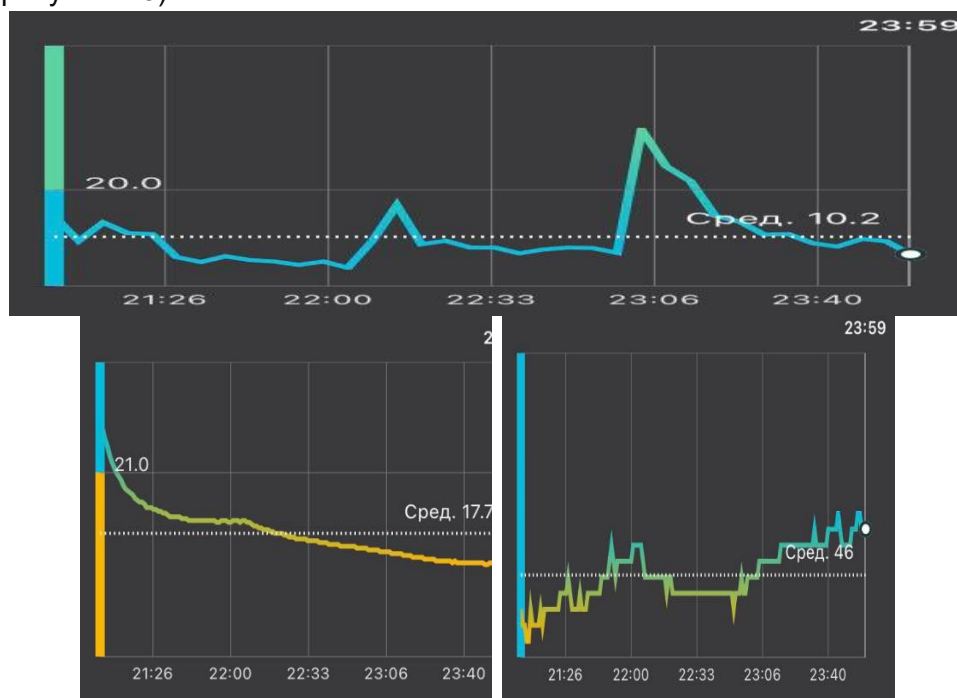


Рисунок 5 – Динамика концентрации $PM_{2.5}$ до периода пылевого вторжения, $мкг/м^3$

В течение рассматриваемого периода уровень загрязнения твердыми частицами $PM_{2.5}$ остается относительно стабильным. Благоприятный фон для краткосрочного воздействия выражается в среднем значении $10,2 \text{ мкг}/м^3$, что близко к рекомендованным пределам ВОЗ для краткосрочного воздействия и может быть интерпретировано как условно благоприятный фон. Резкий всплеск, который наблюдается в 23:00, носит локальный характер, что не приводит к устойчивому ухудшению качества воздуха. Понижение температуры и изменение радиационного баланса обуславливает увеличение уровня влажности в ночное время. В случае нашего эксперимента увеличение уровня влажности не привело к значимому увеличению концентрации $PM_{2.5}$. Концентрация $PM_{2.5}$ за рассматриваемый период находится на стабильно низком уровне, что указывает на отсутствие значимых источников выбросов и эффективную работу механизмов естественного рассеивания загрязнений. Результаты проведенного эксперимента могут быть эталонной моделью при последующем сравнительном анализе изменений концентрации $PM_{2.5}$ в условиях поступления пылевых масс, что имеет принципиальное значение для оценки вклада трансграничного переноса аэрозолей в формирование качества воздуха региона.

На графике, представленном на рисунке 1.6, наглядно отражено резкое ухудшение качества атмосферного воздуха при внешнем пылевом переносе, что выражается повышенными концентрациями мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$.



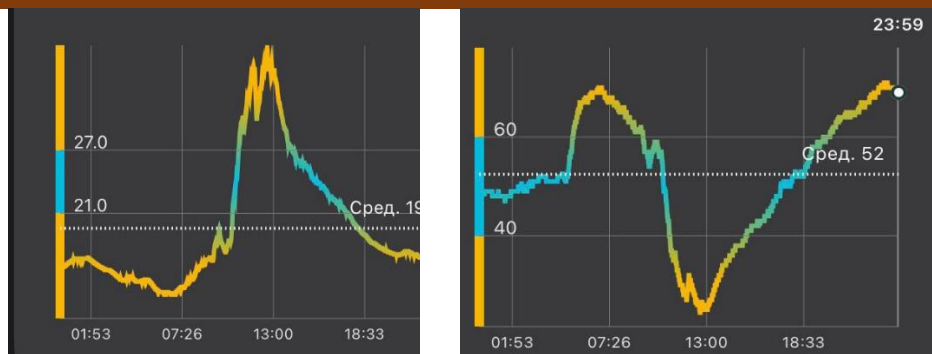


Рисунок 6 – Последствия пылевого вторжения на состояние качества атмосферного воздуха

В ходе суточного наблюдения в период пылевого вторжения были зафиксированы высокие значения $PM_{2.5}$, которые варьируются в пределах $200 - 300 \text{ мкг/м}^3$, достигая пиковых значений $300 - 350 \text{ мкг/м}^3$. Суточная динамика остается повышенной, которая выражается высоким средним значением $85,4 \text{ мкг/м}^3$. До пылевого вторжения среднее значение концентрации $PM_{2.5}$ составляло $10,2 \text{ мкг/м}^3$. Поступление значительного объема пылевых частиц в приземный слой атмосферы обусловило увеличение среднего уровня загрязнения более чем в восемь раз, что не может быть объяснено только обычными городскими выбросами и кратковременной локальной антропогенной активностью.

Увеличение влажности частично повлияло на процессы агрегации и осаждения аэрозоля. Можно сделать вывод, что внешний перенос пылевых масс выступает доминирующим фактором формирования качества воздуха, что выражается резким нарушением обычного режима, который проявляется в экстремальном росте загрязнения. Подобные явления обосновывают необходимость оперативного мониторинга, раннего предупреждения и построения прогностических моделей, которые учитывают трансграничный и региональный перенос пылевых аэрозолей.

Представленные результаты (рисунок 1.7) отражают состояние качества воздуха в условиях ясной погоды. Наблюдение охватывает вечерний период, приблизительно с 19:20 до 23:30, когда после дневного прогрева начинается охлаждение приземного слоя атмосферы и меняются условия рассеивания загрязняющих веществ.

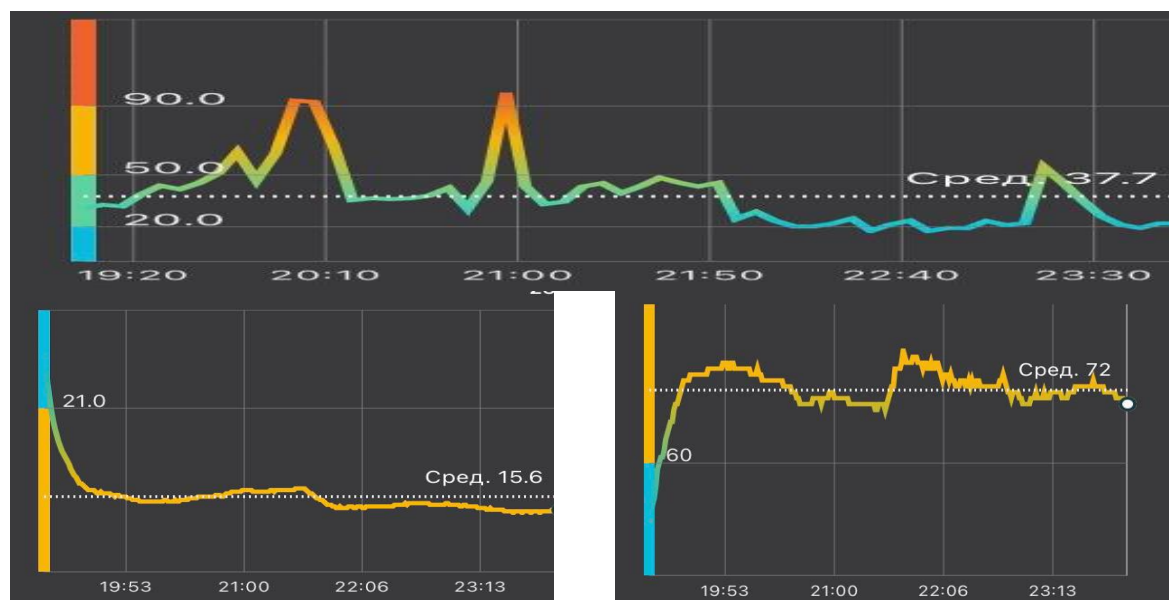


Рисунок 7 – Динамика концентрации $PM_{2.5}$ в условиях ясной погоды (вечер)

По вышеприведенному графику концентрации $PM_{2.5}$ видно, что загрязнение в течение эксперимента носило неравномерный характер. Среднее значение составляет около $37,7 \text{ мкг/м}^3$, что указывает на умеренно повышенный уровень содержания мелкодисперсных частиц в воздухе. В начале наблюдений концентрация находилась примерно в диапазоне $25 - 40 \text{ мкг/м}^3$, однако затем были зафиксированы два выраженных кратковременных пика: первый — около 20:10, второй — приблизительно в районе 21:00. В эти моменты концентрация $PM_{2.5}$ достигала порядка $80 - 90 \text{ мкг/м}^3$.

После 21:50 наблюдается заметное снижение уровня загрязнения, и основная часть значений переходит в диапазон 15 – 25 мкг/м³. К концу периода фиксируется еще один менее продолжительный всплеск, после чего концентрация вновь снижается. При снижении температуры воздух приближается к состоянию насыщения водяным паром. Высокая влажность способствует изменению физических свойств аэрозольных частиц, их укрупнению и более активному удержанию в приземном слое, особенно при слабом ветре и устойчивой стратификации атмосферы. Вечернее охлаждение при ясной погоде способствует ослаблению вертикального перемешивания воздуха, что в результате приводит к тому, что загрязняющие вещества хуже рассеиваются и могут временно накапливаться у поверхности земли.

Кратковременные пики PM2.5, вероятно, связаны с локальными эпизодами поступления частиц: проезд транспорта, бытовое сжигание, пыль с поверхности дорог и другие кратковременные источники. При этом повышенная влажность и снижение температуры создают условия, при которых аэрозольные частицы дольше сохраняются в приземном слое атмосферы. Проведенный эксперимент показывает, что даже при визуально ясной погоде качество воздуха не всегда является благоприятным. Средняя концентрация PM2.5 на уровне 37,7 мкг/м³ свидетельствует о наличии заметной аэрозольной нагрузки, т.е. оценка загрязнения воздуха не должна основываться только на визуальном восприятии погодных условий. Даже при отсутствии пылевого вторжения, осадков или тумана возможны кратковременные и значимые повышения концентрации PM2.5, обусловленные сочетанием локальных источников и вечерней устойчивости атмосферы.

Представленный график (рисунок 1.8) отражает состояние качества воздуха на следующий день наблюдений и позволяет проследить, как изменились концентрации PM2.5. В целом картина показывает более благоприятное состояние атмосферного воздуха. Так, средняя концентрация PM2.5 составила около 16,2 мкг/м³, что значительно ниже показателя предыдущего наблюдения (37,7 мкг/м³).

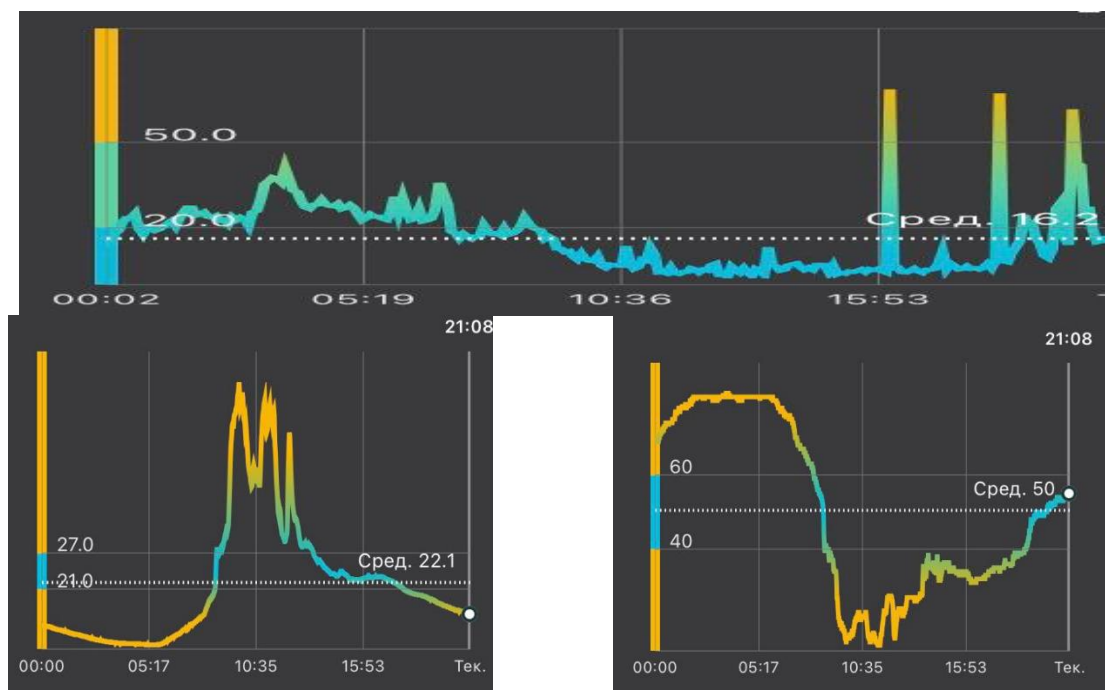


Рисунок 8 – Динамика концентрации PM2.5 в условиях ясной погоды (ночь-утро-день)

Согласно представленному графику, значение концентрации PM2.5 в ночные и ранние утренние часы находились преимущественно в диапазоне 15 – 30 мкг/м³, с отдельным повышением примерно до 40 – 45 мкг/м³. В первой половине дня наблюдается резкое снижение уровня PM2.5, который находится в диапазоне 5 – 15 мкг/м³, что указывает на улучшение качества воздуха и более эффективное рассеивание аэрозольных частиц. Кратковременные пики, которые наблюдаются во второй половине дня, носят эпизодический характер и не формируют длительного загрязнения, что в основном связано с проездом транспорта, поднятием дорожной пыли, кратковременным дымовым эпизодом и изменением направления ветра. Усиление турбулентного перемешивания приземного

связано со снижением уровня влажности и роста температуры, что является следствием быстрого рассеивания взвешенных частиц. Именно поэтому во второй половине дня концентрация PM_{2.5} удерживалась на низком уровне, несмотря на наличие отдельных кратковременных пиков. Следующий день характеризуется более устойчивым и благоприятным состоянием атмосферного воздуха по сравнению с предыдущим наблюдением. Средняя концентрация PM_{2.5} снизилась более чем в два раза – с 37,7 до 16,2 мкг/м³, что свидетельствует о том, что эпизод повышенного загрязнения в ясную погоду не имел продолжительного характера, а при изменении температурно-влажностного режима и усилении атмосферного перемешивания произошло заметное самоочищение приземного слоя воздуха.

Выводы

В результате проведенного эксперимента было установлено:

1. наличие зависимости между концентрацией PM_{2.5} и метеорологическими условиями;
2. наличие стабильно низких концентраций PM_{2.5} в горно-долинной территории, что свидетельствует о низкой антропогенной нагрузке и эффективных механизмах естественного самоочищения атмосферы, которые обусловлены особенностями циркуляции воздуха рассматриваемой территории;
3. внешний перенос пылевых масс выступает доминирующим фактором формирования качества воздуха, что выражается резким нарушением обычного режима, который проявляется в экстремальном росте загрязнения.
4. оценка загрязнения воздуха не должна основываться только на визуальном восприятии погодных условий.

Рецензент: Бобоев Х.Б. — к.т.н., и.о. доцента кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экологии» ПИЛУ имени академика М.С. Осими

Литература

1. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization, 2021. 273 p. URL: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/551b515e-2a32-4e1a-a58c-cdaecd395b19/content> (дата обращения: 17.03.2024).
2. U.S. Environmental Protection Agency. NAAQS Table: National Ambient Air Quality Standards for Criteria Pollutants[Electronic resource]. Washington, DC: U.S. EPA, 2025. URL: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>(дата обращения: 17.03.2024).
3. Directive (EU) 2024/2881 of the European Parliament and of the Council of 23 October 2024 on ambient air quality and cleaner air for Europe (recast) // Official Journal of the European Union. 2024. OJ L, 2024/2881, 20.11.2024. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/2881/oj/eng> (дата обращения: 17.03.2024).
4. Wang Y., Li J., Jing H., et al. Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement // Aerosol Science and Technology. 2015. Vol. 49, N 11. P. 1063–1077. doi: 10.1080/02786826.2015.1100710
5. Rai A.C., Kumar P., Pilla F., et al. End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring // Sci Total Environ. 2017. Vol. 607-608. P. 691–705. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.266
6. LOH M., SARIGIANNIS D., GOTTI A., KARAKITSIOS S., PRONK A., KUIJPERS E., ANNESI-MAESANO I., BAIZ N., MADUREIRA J., FERNANDES E.O., JERRETT M., and CHERRIE J.W. How sensors might help define the external exposome. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph14040434>
7. BARAKEH Z., BREUIL P., REDON N., PIJOLAT C., LOCOGE N., and VIRICELLE J.P. Development of a normalized multi-sensors system for low cost on-line atmospheric pollution detection. Sensors and Actuators, B: Chemical, 2017, 241: 1–10. doi: 10.1016/j.snb.2017.06.030
8. DUTTA J., GAZI F., ROY S., and CHOWDHURY C. AirSense: Opportunistic crowd-sensing based air quality monitoring system for smart city. In: 2016 IEEE Sensors, 30 October 2016 – 03 November 2016, Orlando, USA. 2017: 5-https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808730
9. KHUNSONGKIET P., and BOONCHIENG E. Converting air quality monitoring low cost sensor data to digital value via mobile interface. In: 2016 9th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON), 07-09 December 2016, Laung Prabang, Laos. 2016, <https://doi.org/10.1109/BMEiCON.2016.7859628>
10. Koehler KA, Peters TM. New methods for personal exposure monitoring for airborne particles. Curr Environ Health Rep. 2015;2(4):399–411. doi: 10.1007/s40572-015-0070-z
11. Thomas A, Gebhart J. Correlations between gravimetry and light scattering photometry for atmospheric aerosols. Atmospheric Environment. 1994;28(5):935–938. doi: 10.1016/1352-2310(94)90251-8
12. Northcross A.L., Edwards R.J., Johnson M.A., et al. A low-cost particle counter as a real-time fine-particle mass monitor // Environ Sci Process Impacts. 2013. Vol. 15, N 2. P. 433–439. doi: 10.1039/c2em30568b
13. Sousan S., Koehler K., Thomas G., et al. Inter-comparison of low-cost sensors for measuring the mass concentration of occupational aerosols // Aerosol Sci Technol. 2016. Vol. 50, N 5. P. 462–473. doi: 10.1080/02786826.2016.1162901

14. Sensirion. Particulate Matter Sensor SPS30: Datasheet. – Stäfa: Sensirion AG. – Электронный ресурс. – Режим доступа: https://sensirion.com/media/documents/8600FF88/64A3B8D6/Sensirion_PM_Sensors_Datasheet_SPS30.pdf (дата обращения: 28.03.2026).

15. Хакдод, М. М. Моделирование процесса шумообразования при соударение деталей машин и методика исследования акустодемпфирующих свойств материалов / М. М. Хакдод, Б. Н. Одиназода, Ш. А. Бозоров // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2023. – № 2(62). – С. 100-105. – EDN YKIOGJ

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ-СВЕДЕНИЕ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHOR

TJ	RU	EN
Ҳақдодов Акбарҷон Маҳмадшарифович	Хакдодов Акбарчон Махмашарифович	Haqdodov Akbarjon Mahmadsharifovich
унвонҷуй	соискатель	applicant
Институти масълаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи АМИТ	Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ	Institute of water problems, hydropower and ecology of the National academy of science of Tajikistan
E-mail: hakdodovakbar@gmail.com		